

Noppenwaben als neue Kernwerkstoffe für Leichtbauanwendungen

Von der Fakultät für Umwelt und Naturwissenschaften
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing)

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur

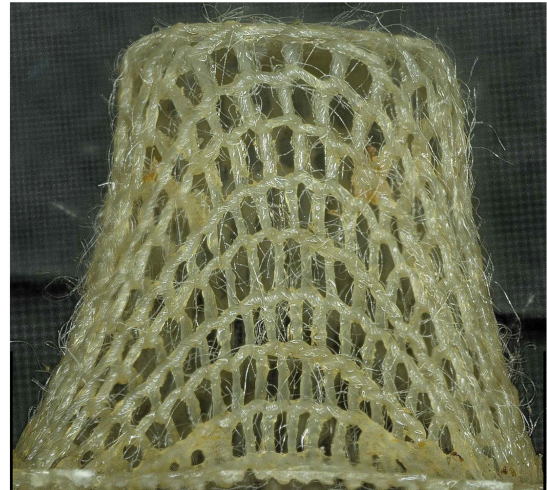
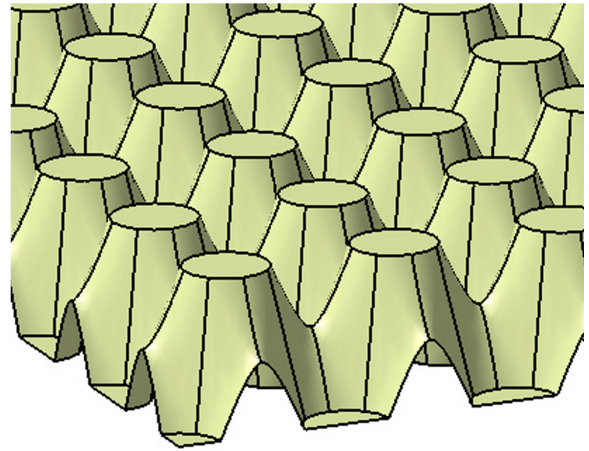
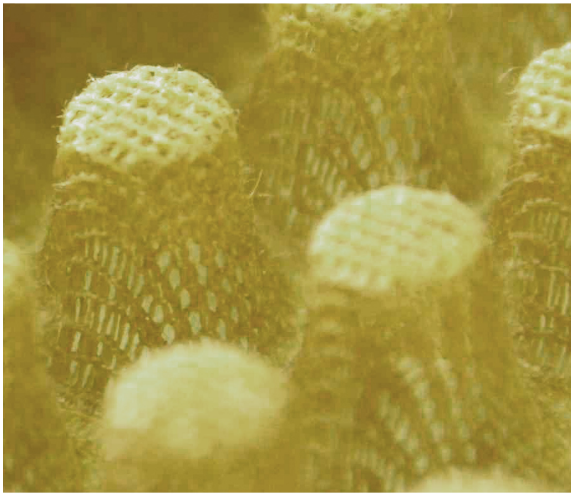
Nils Christoph Gerber

aus Nürnberg

Gutachter: Prof. Dr. sc. nat. Monika Bauer
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Holger Seidlitz
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Manfred Zehn

Tag der mündlichen Prüfung: 25. November 2016

Noppenwaben als neue Kernwerkstoffe für Leichtbauanwendungen



Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr. Monika Bauer für die Bereitstellung des interessanten Themas, die engagierte Betreuung dieser Arbeit, ihre hilfreichen Ratschläge in chemischen Belangen sowie das entgegengebrachte Vertrauen in meine Arbeit. Ebenso möchte ich mich bei Herrn Dr. Christian Dreyer für die fachliche Betreuung sowie zahlreiche konstruktive Gespräche und Hinweise bedanken.

Herrn Prof. Dr. Seidlitz vom „Fachgebiet Leichtbau mit strukturierten Werkstoffen“ der BTU Cottbus-Senftenberg danke ich für das entgegengebrachte Interesse an meiner Arbeit, das kurzfristig terminierte Gespräch mit zahlreichen konstruktiven Vorschlägen und Hinweisen sowie die Übernahme des Koreferates.

Weiterhin bedanke ich mich bei Andreas Bernaschek von der InnoMat GmbH für die tatkräftige Unterstützung bei der Herstellung von Noppenwaben sowie zahlreiche gemeinsame Brainstormings und daraus hervorgehende wertvolle Impulse und Optimierungsvorschläge.

Herr Dr. Lutz Hartmann hat zusammen mit Nils Ischdonat und Frau Dr. Cornelia Pithart entscheidenden Anteil an einer stets sehr angenehmen Arbeitsatmosphäre, die eine Vielzahl konstruktiver Gespräche ermöglicht und die Forschung im Rahmen dieser Arbeit wesentlich erleichtert hat.

Weiterhin gilt mein Dank allen Kollegen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Besonders die Unterstützung in allen technischen Belangen war unverzichtbar, weshalb ich mich bei Volkmар Banse, Mario Kaiser, Björn Schöbe und Tiberiu Mihai Tatai für unzählige Stunden in der Werkstatt und die Hilfe bei Fertigung und Aufbau der Versuchs- und Pilotanlage zur Noppenherstellung bedanken möchte. In diesem Zusammenhang gilt mein Dank besonders der Unterstützung bei der Herstellung der Werkzeugelemente und dem Einkleben von ca. 109.000 Zylinderstiften.

Darüberhinaus möchte ich mich für vielfältige Unterstützung bei folgenden Kollegen bedanken: Katharina Becker, Dr. Olaf Kahle, Karina Klauke, Ilona Kohn, Torsten Lerz, Cathleen Luxath, Thomas Mühlenberg, Joachim Müller, Dominik Söthje, Christoph Uhlig, Renate Wegner, Rajko Wurzel sowie allen weiteren Mitarbeitern der Fraunhofer-Einrichtung für Polymermaterialien und Composite PYCO. Ebenso gilt mein Dank Yvonne Chowdhury von der InnoMat GmbH.

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fraunhofer-Einrichtung für Polymermaterialien und Composite PYCO. Der Großteil der Arbeiten wurde im Rahmen des Projekts „DIANA - Die Technologien für eine energieautarke, intelligente Kabine“, einem durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projekt (Förderkennzeichen: 20K1101H) durchgeführt. Ich danke dem BMWi, ohne dessen finanzielle Unterstützung die Arbeiten zur Entwicklung eines kontinuierlichen Fertigungsverfahrens für Noppenwaben nicht möglich gewesen wären.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Freunden, meiner Schwester und meinen Eltern bedanken, die mir bisweilen einen frischen Blickwinkel auf die Arbeit ermöglicht und stets für einen Ausgleich zur Forschung gesorgt haben.

Vielen Dank an alle.

Kurzfassung

Sandwichstrukturen, bestehend aus zwei Decklagen und einem dazwischen liegenden Kernmaterial, stellen den Stand der Technik zur Herstellung von Bauteilen mit niedrigem Gewicht und hoher mechanischer Stabilität dar. Die Wahl des eingesetzten Kernmaterials hat dabei entscheidenden Einfluss auf die mechanischen Kenngrößen sowie weitere Eigenschaften des Verbundes, wie z.B. Brandverhalten, Wasseraufnahme oder Wärmeleitfähigkeit. Entsprechend dem variierenden Anforderungsprofil an Sandwichbauteile bietet der Markt eine Vielzahl unterschiedlicher Kernwerkstoffe.

Die Auswahl an brandfesten Kernmaterialien, wie sie beispielsweise für den Einsatz im Flugzeug-Interiorbereich zum Einsatz kommen, ist dabei limitiert. Das am weitesten verbreitete Kernmaterial zur Herstellung von Sandwichbauteilen mit guten FST-Eigenschaften (Fire Smoke Toxicity) für den genannten Einsatzbereich stellen Honeycombs aus Nomex®-Papier dar. Für Anwendungen bei denen die mechanischen Eigenschaften des Kernmaterials nicht im Vordergrund stehen, wie z.B. bei nichttragenden Verkleidungselementen, stellen textile Noppenwaben aufgrund niedriger Herstellungskosten, der Möglichkeit zur Integration verschiedener Funktionalitäten sowie ihrem überlegenen Impact-Verhalten eine interessante Alternative zu Honeycombs dar.

Textile Noppenwaben bestehen aus einer flächigen, mit Harz imprägnierten Maschenware, welche in einem ersten Schritt zu einer dreidimensionalen Noppenstruktur geformt und anschließend durch Härtung des Harzes stabilisiert wird. Üblicherweise verfügen Maschenwaren über eine hohe Elastizität, sodass sich auch Garne mit geringer Dehnung aus z.B. Aramid-, Glas- oder Hybridfasern in dieser Form zu Noppenwaben verarbeiten lassen. Aufgrund zahlreicher Freiheitsgrade, die sich aus der Wahl des Garnmaterials, der Maschenbindung, des Matrixmaterials sowie der Noppengeometrie ergeben, können die Eigenschaften dieses innovativen Kernmaterials in einem weiten Bereich variiert und das Kernmaterial für vielfältige Anwendungen gezielt angepasst werden.

Ein wesentliche Hürde für den Einsatz von Noppenwaben besteht bislang in der aufwändigen diskontinuierlichen Herstellung mittels Plattenwerkzeugen in einer beheizbaren Presse. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus auf der Entwicklung eines Verfahrens zur kontinuierlichen Herstellung von Noppenwaben. Bei diesem Verfahren wird das harz imprägnierte Textil zwischen zwei beheizten Werkzeugbändern in Form gebracht und anschließend ausgehärtet. Während das diskontinuierliche Verfahren nur die zeitaufwändige Fertigung vergleichsweise kleiner Noppenwabenplatten zulässt, bietet das kontinuierliche Fertigungsverfahren im Gegensatz dazu die Möglichkeit, Noppenwaben mit deutlich geringerem Zeitaufwand als Endlosmaterial herzustellen.

Im Zuge der Entwicklung des kontinuierlichen Fertigungsverfahrens wird aus der Analyse der bisher hergestellten einseitigen Noppenwabe eine neue symmetrische Geometrie abgeleitet. Unter anderem werden dazu die Formänderungen der Maschenware bei der Formgebung zur Noppenwabe untersucht und unterschiedliche Geometrien miteinander verglichen.

Symmetrische Noppenwaben werden mit einseitigen Noppenwaben und etablierten luftfahrtzugelassenen Kernmaterialien, wie ausgewählten Schäumen und Honeycombs hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften verglichen, um deren Potential für den Einsatz als leichtes und brandfestes Kernmateri-

al zu beurteilen. Dafür werden kontinuierlich hergestellte Noppenwaben hinsichtlich Druckfestigkeit, Schubfestigkeit, Biegefestigkeit und Impact-Verhalten ebenso getestet wie die Anbindung an die Decklagen im Trommelschälversuch.

Neben den genannten Untersuchungen, werden weitere, nicht-mechanische Charakteristika wie FST-Verhalten, Drapierbarkeit und die Möglichkeit, zusätzliche Funktionen zu integrieren, betrachtet.

Abstract

Sandwich structures consisting of two outer layers with a light core material in between are state of the art for the construction of lightweight structures with high mechanical load capacity. The choice of the core material has a great influence on the mechanical properties as well as on other characteristics like flammability, water uptake etc.. According to varying requirements the market offers a multitude of different core materials.

The variety of fireproof core materials, suitable for aircraft interior is limited. The preferred core material to manufacture light sandwichpanels with good FST-properties (Fire Smoke Toxicity) are Nomex® honeycombs. For applications with low requirements concerning the mechanical properties, like covering panels, textile napcore material is an interesting alternative to honeycombs, due to the possibility to integrate functionality and their superior impact-behavior.

Textile napcore material is made from a two-dimensional resin-impregnated knitted fabric that is formed to a three-dimensional nap structure and stabilized by the curing of the resin matrix. Depending on the compliance of the knitted fabric a variety of materials like thermoplastic-, aramid-, glass- or hybrid-yarn can be used. The possibility to use different yarn materials, knitting patterns, matrix materials and nap geometries for the structures results in a wide range of properties and offers excellent adaptability to numerous applications.

At present, a substantial drawback of textile napcore material is its complex and costly production in a discontinuous process with a heated press. The discontinuous process is time consuming and only allows the production of comparatively small panels.

In the context of this thesis an economic process for a continuous production of napcore material was developed and put into operation. The impregnated textile is formed between two heated belts and directly cured afterwards. Using the newly developed process, napcore material can be produced significantly faster as an endless material.

In the course of the development of the described production process, the established single sided napcore geometry manufactured in the discontinuous process is analyzed for optimization and a symmetrical napcore geometry with better drapability is invented. Furthermore research about the deformation of the fabric is made to compare different geometries.

Symmetrical napcores are analyzed in terms of mechanical properties and compared to single sided napcores and aviation-certified materials such as selected foams and honeycombs, to evaluate their prospects for lightweight applications. For symmetrical napcores mechanical properties like compressive strength, shear strength, flexural strength and impact behavior were tested as well as the bonding between core material and outer layers by drum peel test.

In addition to the mechanical tests non-mechanical characteristics like flammability, drapability and the ability to integrate extra functionality are regarded.

Eigene Veröffentlichungen

Gerber, N. und Bernaschek, A., und Dreyer, C. und Klauke, K. und Bauer, M., und Bauer, A. - „Progress on the Development and Automated Production of New Core Materials“, Thermosets - From Monomers to Components - Proceedings of the 3rd Conference on Thermosets, S.190-193, 2013

Gerber, N. und Bauer, M. und Dreyer C., „Kontinuierlich herstellbares Kernmaterial zur Funktionsintegration in Sandwichbauteilen“, Konstruktion - Zeitschrift für Produktentwicklung und Ingenieur-Werkstoffe (3), S. IW 14-16, 2015

Gerber, N. und Dreyer, C. und Bernaschek, A. und Becker, K - „DIANA - Die Technologien für eine Energie-autarke, intelligente Kabine - Alternative Kernmaterialien“, Projektabschlussbericht (Förderkennzeichen: 20K1101H), 2015

Gerber, N., Uhlig, C., Dreyer, C., Chowdhury, Y. - „Symmetrical Napcore and Honeycomb Sandwich Structures under Impact Load“, Fibers and Polymers, Vol. 17, No. 12, S. 2124-2130, 2016

Abkürzungsverzeichnis

ASTM	American Society for Testing and Materials
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
DIN	Deutsches Institut für Normung
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
EXT	Extinktionskoeffizient
FAA	Federal Aviation Administration
FFKM	Perfluorkautschuk
FST	Fire-Smoke-Toxicity
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
HRR	Wärmefreisetzungsrate (Heat Release Rate)
ISO	International Organization for Standardization
IR	Infrarot
Ma.-%	Massenanteil in Prozent
MARHE	Maximalwert der mittleren Wärmeemission (Maximum Average Rate of Heat Emission)
MEK	Methylethylketon
OX	Overexpanded (Honeycomb)
PC	Polycarbonat
PID-Regler	Regler mit Proportionalem, Integralen und Differentialen Verhalten
PP	Polypropylen
ppm	parts per million
PTFE	Polytetrafluorethylen
PUR	Polyurethan
RTM	Resin Transfer Molding
SPS	Speicherprogrammierte Steuerung
TGA	Thermogravimetrische Analyse
THR	Gesamtwärmefreisetzung (Total Heat Release)
THRR	Zeitpunkt der maximalen Wärmefreisetzungsrate (Time to Heat Release Rate peak)
TMA	Thermo Mechanische Analyse
TSR	Gesamte Rauchgasfreisetzung (Total Smoke Release)
TTI	Entzündungszeit (Time to Ignition)
VARTM	Vacuum Assisted Resin Transfer Molding

Formelzeichen

A	Fläche
B	Biegesteifigkeit
b	Breite
D	Durchmesser der Bohrung im Negativwerkzeug
d	Durchmesser der Zylinderstifte im Positivwerkzeug
E	E-Modul
F	Kraft
G	Schubmodul
h	Höhe
I	Flächenträgheitsmoment
M	Moment
N	Normalkraft
Q	Querkraft
S	Schubsteifigkeit
t	Dicke
w''	Krümmung (math. Ableitung des Steigungswinkels w')
σ	Spannung
ϵ	Dehnung

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	ii
Abstract	iv
Abkürzungsverzeichnis	vi
Formelzeichen	vii
1 Einleitung	1
2 Problemstellung	2
3 Zielstellung	4
4 Literaturübersicht	5
4.1 Sandwichstrukturen im Leichtbau	5
4.1.1 Theorie von Sandwichtragwerken	5
4.1.2 Übersicht verschiedener Kernmaterialien	12
4.1.3 Versagensfälle bei Sandwichstrukturen	28
4.2 Textile Noppenwaben als Kernmaterial	29
4.2.1 Herstellung textiler Noppenwaben	31
4.2.2 Geeignete Textilien zur Herstellung von Noppenwaben	35
4.2.3 Verbesserungspotential bestehender Noppenwaben	39
5 Untersuchungen zu Noppenwaben	42
5.1 Versuche zur Optimierung der Noppengeometrie	42
5.1.1 Versuche mit zwei Positivwerkzeugen	42
5.1.2 Optimierung der Bauteiloberfläche	45
5.2 Untersuchung der Textilverformung bei einseitiger und symmetrischer Geometrie	47
5.2.1 Einseitige Noppe mit Positiv-/Negativwerkzeug - Flächige Betrachtung der Formänderung	48
5.2.2 Einseitige Noppe mit Positiv-/Negativwerkzeug - Betrachtung der Formänderung in der xz-Ebene	51
5.2.3 Symmetrische Noppe mit 2 Positivwerkzeugen - Flächige Formänderung	53
5.2.4 Symmetrische Noppe mit 2 Positivwerkzeugen - Betrachtung der Formänderung in der xz-Ebene	56
6 Entwicklung eines Fertigungskonzepts zur kontinuierlichen Herstellung von Noppenwaben	58
6.1 Konzeptüberlegungen zur kontinuierlichen Herstellung von Noppenwaben	59
6.1.1 Bänder mit Noppenkontur	59
6.1.2 Walzenpaar mit Noppenkontur	60
6.1.3 Tiefziehwalze mit lokalem Unterdruck	61
6.1.4 Walze mit Positivkontur und Netz	62
6.1.5 Kombination mehrerer Walzen	63
6.1.6 Vergleich und Bewertung der verschiedenen Konzepte	63

6.2	Materialauswahl für eine Anlage zur kontinuierlichen Herstellung von Noppenwaben .	66
6.3	Aufbau von Anlagen für die kontinuierliche Herstellung von Noppenwaben	70
6.3.1	Auftragen des Trennmittels	72
6.3.2	Zuführung des Prepregs	73
6.3.3	Formgebung zur Noppenstruktur	76
6.3.4	Aushärtung des Prepregs	79
6.3.5	Antrieb der Werkzeugbänder	80
6.3.6	Entformung der Noppenwabe	81
6.3.7	Reinigung der Werkzeuge	81
6.3.8	Konfektionieren der Noppenwabe	82
6.4	Kostenbetrachtung der kontinuierlichen Herstellung von Noppenwaben	82
7	Charakterisierung kontinuierlich hergestellter Noppenwaben	85
7.1	Herstellung von Probekörpern	85
7.2	Mechanische Eigenschaften	90
7.2.1	Druckfestigkeit	90
7.2.2	Schubfestigkeit	96
7.2.3	Anbindung an die Decklagen	99
7.2.4	Biegefestigkeit	102
7.2.5	Impact-Verhalten	105
7.3	Untersuchung der Brandeigenschaften	113
7.4	Herstellung von Funktionsmustern mit symmetrischer Noppenwabe als Kernmaterial	117
8	Zusammenfassung und Ausblick	120
	Literaturverzeichnis	127
	Abbildungsverzeichnis	132
	Tabellenverzeichnis	133
	Geräteverzeichnis	134
A	Anhang	135
A.1	Patentrecherche zur Noppenwabe	135
A.2	Versuchsprotokolle	137
A.3	Auslegung der Antriebe für die Pilotanlage	141
A.4	Auslegung der Lagerung für die Werkzeugbänder	142

1 Einleitung

Die fortschreitende Globalisierung schafft sowohl im industriellen als auch im privaten Bereich zunehmend Möglichkeiten, neue Absatzmärkte zu erschließen und auch weit entfernte Länder in kurzer Zeit zu erreichen. Die gewachsene und noch weiter zunehmende Mobilität hat dabei große Auswirkungen auf den Transportsektor. Dort werden große Massen bewegt und beschleunigt, sodass der Leichtbau in den Fokus rückt und zunehmend an Bedeutung gewinnt. In vielen Bereichen lässt sich durch optimierte Bauweise das Gewicht von Bauteilen oder Strukturen senken, wodurch Energie eingespart und Betriebskosten reduziert werden können. Sandwichstrukturen sind besonders geeignet, den stetig wachsenden Anforderungen nach immer leichteren und gleichzeitig festen und steifen Bauteilen zu begegnen. Die Kombination eines leichten Kernmaterials mit festen Decklagen zu einem Sandwichverbund ermöglicht es, leichte und zugleich belastbare Bauteile herzustellen [1]. Die einfachste Form eines Sandwichelements besteht aus drei Schichten, den beiden äußeren vergleichsweise dünnen Decklagen und der dazwischen liegenden dicken Kernschicht. Diese muss zug- und schubfest mit den Decklagen verbunden sein [1], um eine gemeinsame Tragwirkung zu realisieren. Dabei werden in der Regel möglichst feste Decklagen angestrebt, um die Bauteile biegesteif zu gestalten.

Das zwischen den beiden Decklagen liegende Kernmaterial muss für den Einsatz im Sandwichverbund eine Reihe spezifischer Anforderungen erfüllen. Hierzu zählen neben einer ausreichend hohen Druck- und Schubfestigkeit eine gute Anbindung an die Decklagen sowie weitere Faktoren, wie niedriges Gewicht, ein gutes Brandverhalten, die chemische Beständigkeit gegenüber aggressiven Medien und geringe Kosten. Um ein breites Anwendungsspektrum bedienen zu können, bietet der Markt eine Vielzahl an unterschiedlichen Kernmaterialien. Ausgewählte Vertreter der in Kapitel 4.1.2 vorgestellten Kernmaterialien sind textile Noppenwaben, welche bereits in der Vergangenheit Inhalt der Forschung bei der Fraunhofer PYCO und der InnoMat GmbH waren [2–6].

Textile Noppenwaben werden durch Formgebung und Aushärtung mit Harz imprägnierter textiler Maschenwaren erzeugt. Durch Variation von Fasermaterial, Struktur und Flächengewicht des Textils, der Harzmatrix sowie der Ausgestaltung von Noppenform, -durchmesser und -höhe, lassen sich Noppenwaben an eine Vielzahl von Anwendungsfällen gezielt anpassen.

Ein enormer Vorteil ist, dass durch Auswahl geeigneter Faser-Harz-Kombinationen brandfeste Noppenwaben herstellbar sind, welche die strengen Anforderungen für den Einsatz in Verkehrsflugzeugen erfüllen können. Dadurch rücken textile Noppenwaben als vielversprechendes Kernmaterial zur Herstellung leichter Komponenten wie Verkleidungselementen in den Fokus weiterer Forschungen für den Einsatz in der Luftfahrt und im Schienenverkehr.

2 Problemstellung

Im Flugzeugbereich entfällt neben den tragenden Strukturen, beispielsweise für Rumpf und Tragflächen, ein hoher Anteil des Gewichts auf den Interior-Bereich und dort verwendete Verkleidungselemente. Die mechanischen Anforderungen an Bauteile, wie beispielsweise Deckenpaneele oder Trennwände sind weitaus geringer als an tragende Strukturen. Wesentlich sind jedoch auch für diese Komponenten sehr gute FST-Eigenschaften (Fire Smoke Toxicity), gute Formstabilität sowie eine geringe Wärme-freisetzung im Brandfall.

Der Markt für im Flugzeug-Interior verwendete Materialien ist riesig. Duomere Prepregs, Honeycombs oder Hochleistungsthermoplaste werden in großen Mengen eingesetzt, für eine einzige Boeing 777 mehr als 5.100 kg [7]. Darüberhinaus besteht der Bedarf nach derartigen Materialien nicht nur bei der Herstellung neuer Flugzeuge, sondern auch im Rahmen der regelmäßigen Kabinenerneuerung. So werden Interior-Bauteile in der Regel nach drei bis sieben Jahren ausgetauscht [7].

Alle für den Passagiertransport zugelassenen Flugzeuge müssen strenge Brandanforderungen (siehe Norm FAR/JAR 25853 [8]) erfüllen, was die Auswahl geeigneter Materialien deutlich einschränkt. Die bei weitem häufigste Anwendung im Interiorbereich finden Sandwichpanels mit Honeycomb-Kern und duomeren Harzen, wie sie beispielsweise bei Boden- oder Deckenpaneelen, Seitenverkleidungen, Trennwänden oder im WC und Küchenbereich zum Einsatz kommen. Typischerweise werden hierbei Nomex®-Honeycombs mit einer oder zwei Lagen eines mit Phenolharz imprägnierten Glasgewebes kombiniert.

Trotz der extensiven Verwendung von Honeycombs birgt dieses Kernmaterial eine Reihe von Nachteilen. Die geschlossene Struktur der Honeycombs kann zum Einschluss und zur Ansammlung von Kondenswasser in einem Sandwichpanel führen, wodurch sich das Gewicht erhöht und die mechanischen Eigenschaften geschwächt werden [9, 10]. Weiterhin müssen bei Honeycombs mit hexagonaler Zellgeometrie deutliche Abstriche hinsichtlich der Drapierbarkeit gemacht werden. Hexagonale Honeycombs bilden bei zylindrischer Krümmung eine Sattelform aus und lassen sich nicht ohne Beschädigung der Wabenstruktur zylindrisch drapieren. Ein weiterer großer Nachteil der Honeycombs ist deren aufwändige und zeitintensive Herstellung, welche einen hohen Preis des Kernmaterials zur Folge hat.

Mangels Alternativen an leichten, brandfesten Kernmaterialien werden Honeycombs dennoch im großen Umfang verarbeitet, wenngleich sie für viele Einsatzbereiche im Interior-Bereich mechanisch überdimensioniert sind. Die oben genannten Nachteile werden dabei in Kauf genommen. Gegenwärtig wird der mangelhaften Drapierbarkeit des Kernmaterials, die vor allem die Herstellung gekrümmter Bauteile deutlich erschwert, durch den Einsatz des Crush-Core Verfahrens begegnet. Dabei handelt es sich um einen Verarbeitungsprozess, bei dem ein mit Decklagen versehener Sandwichkern in eine beheizte Pressform gelegt und auf eine festgelegte Dicke komprimiert wird. Dieser Prozess, überwiegend von Boeing und Airbus eingesetzt, hat sich zur Herstellung gekrümmter Seiten- oder gewölbter Fensterverkleidungen etabliert. Durch die Kompression des Sandwichaufbaus mit einem Druck von bis zu 300 psi / 20,7 bar wird die Wabenstruktur der Honeycombs zerstört und das Kernmaterial in seine Form gezwungen [7].

Durch den Einsatz textiler Noppenwaben als Kernmaterial für Verkleidungselemente kann ein beträchtlicher Anteil der oben genannten Nachteile eliminiert werden. Mit geeigneten Faser-Harz-

Kombinationen lässt sich auch bei diesem Kernmaterial ein sehr gutes FST-Verhalten realisieren. Vorteile ergeben sich durch die offene Struktur des Kernmaterials, wodurch das Sandwichpanel getrocknet und Feuchtigkeitsansammlungen im Bauteil vermieden werden können. Die offene Struktur lässt darüber hinaus die Integration von Kabeln oder Leitungen ins Bauteil zu und bietet so die Möglichkeit zur Funktionsintegration, beispielsweise durch integrierte elektrische Komponenten oder Luftausströmer. Weiterhin lässt sich die Noppenwabe problemlos über zylindrische und konische Flächen drapieren und bietet in diesem Punkt einen weiteren Vorteil gegenüber hexagonalen Honeycombs.

Die oben genannten Vorteile der Noppenwabe bieten großes Potential für die Anwendung und Optimierung von Verkleidungselementen im Flugzeug-Interiorbereich. Ein großes Hindernis ist aktuell die Produktion der Noppenwaben, die bislang nur durch ein diskontinuierliches und zeitaufwendiges Herstellungsverfahren möglich ist, welches nur vergleichsweise geringe Mengen erzeugen kann. Ein wirtschaftliches und effizientes Verfahren zur Herstellung brandfester textiler Noppenwaben ist derzeit nicht verfügbar. Um den Einsatz des vielversprechenden Kernmaterials weiter voranzubringen, liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Entwicklung eines effizienten und kontinuierlichen Fertigungsverfahrens und dem Aufbau einer Anlage, dies es ermöglicht, die Produktionskapazität von Noppenwaben zu erhöhen und gleichzeitig die Herstellungskosten zu senken.

3 Zielstellung

Die Entwicklung eines wirtschaftlichen, kontinuierlichen Verfahrens zur Herstellung textiler Noppenwaben hat zum Ziel, mit diesem Kernmaterial eine preiswerte Alternative zu Honeycombs im Bereich leichter, brandfester Kernmaterialien zu schaffen. Aufgrund ihrer Struktur bieten Noppenwaben wesentliche Vorteile gegenüber hexagonalen Honeycombs, wie z.B. eine bessere Drapierbarkeit über zylindrische und konische Flächen, die Möglichkeit der Drainierbarkeit oder der Integration von Kabeln oder Leitungen in das Sandwichpanel. Die schwächeren mechanischen Eigenschaften der Noppenwabe sind dabei für viele Anwendungsbereiche, wie z.B. bei Verkleidungselementen ohne tragende Funktion nicht relevant.

Ein effizientes Verfahren zur Herstellung textiler Noppenwaben ist essentiell für eine umfangreiche Bereitstellung und den kommerziellen Einsatz dieses leichten und variablen Kernmaterials. Das Verfahren soll idealerweise die Herstellung verschiedener Geometrien und Kernhöhen erlauben und die Verarbeitung unterschiedlicher Textilien und Harzsysteme zulassen, um die Eigenschaften des Kernmaterials je nach Anwendung variieren zu können. Der Fokus liegt dabei auf der Verarbeitung brandfester Textilien und Duromerharze zur Herstellung von Noppenwaben mit luftfahrttauglichen FST-Eigenschaften. Eine weitere Vorgabe an das zu entwickelnde Verfahren ist die Anbindung an eine bereits bestehende horizontale Imprägnieranlage, um den ersten Schritt - die Imprägnierung des Textils mit Harz - direkt vor der Formgebung zur Noppenwabe vornehmen zu können. Ziel der Entwicklung ist es, sämtliche Prozessschritte von der Verarbeitung eines trockenen Textils zum fertigen Kernmaterial aufeinanderfolgend automatisiert durchzuführen.

Zugleich soll im Rahmen dieser Arbeit die bestehende einseitige Noppengeometrie vor dem Hintergrund der kontinuierlichen Fertigung optimiert werden, mit dem Ziel, unter anderem die eingeschränkte Drapierbarkeit über mehrfach gekrümmte Flächen zu reduzieren. Desweiteren werden umfangreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt, mittels derer das kontinuierlich hergestellte Kernmaterial umfassend charakterisiert und mit luftfahrtzertifizierten Schäumen sowie Honeycombs verglichen werden kann. Neben mechanischen Kennwerten, wie Druck-, Schub- und Biegeeigenschaften wird die Anbindung des Kernmaterials an die Decklagen im Trommelschälversuch, sowie das Impact-Verhalten von Sandwichbauteilen untersucht. Darüber hinaus geben Branduntersuchungen mittels Cone-Kalorimeter Auskunft über das FST-Verhalten der verschiedenen Sandwich-Varianten.

4 Literaturübersicht

4.1 Sandwichstrukturen im Leichtbau

Die American Society for Testing and Materials (ASTM) definiert eine Sandwichstruktur als eine spezielle Form eines laminierten Verbundes, bestehend aus der Kombination verschiedener Materialien, die so miteinander verbunden sind, dass die Eigenschaften jeder einzelnen Komponente zum Vorteil der Struktur des gesamten Bauteils genutzt werden [11].

Durch den Einsatz verschiedener Materialien lassen sich zahlreiche Eigenschaften, wie z.B. Dichte, Wärmeleitung, Dämpfungsverhalten, elektrische Leitfähigkeit usw. variieren, wodurch ein breites Spektrum an mechanischen, thermischen oder akustischen Vorgaben abgedeckt werden kann. Diese Vorteile eröffnen den Sandwichverbunden ein breites Anwendungsfeld in verschiedenen Bereichen. Eingesetzt werden Sandwichstrukturen unter anderem im Bau- und Transportwesen, wie z.B. im Fahrzeugbau oder der Luft- und Raumfahrttechnik.

4.1.1 Theorie von Sandwichtragwerken

Bei der Gestaltung biege- oder torsionsbelasteter Bauteile sind große Flächenträgheits- bzw. Widerstandsmomente anzustreben, um hohe Bauteilsteifigkeiten zu realisieren. Senkrecht zu einer Bezugsachse angreifende Kräfte haben, sofern sie versetzt zu dieser Achse angreifen und somit ein Moment ausbilden, das Bestreben einen Körper um diese Achse zu biegen oder zu drehen. Ist der Körper fest eingespannt und verhindert eine solche Biegung oder Torsion, resultiert daraus ein Biege- oder Torsionsmoment. Exemplarisch ist in Abbildung 4.1 ein freigeschnittener Balken mit den zugehörigen Momenten (M_t , M_{by} , M_{bz}), Normal- (N) und Querkraften (Q_y , Q_z) dargestellt.

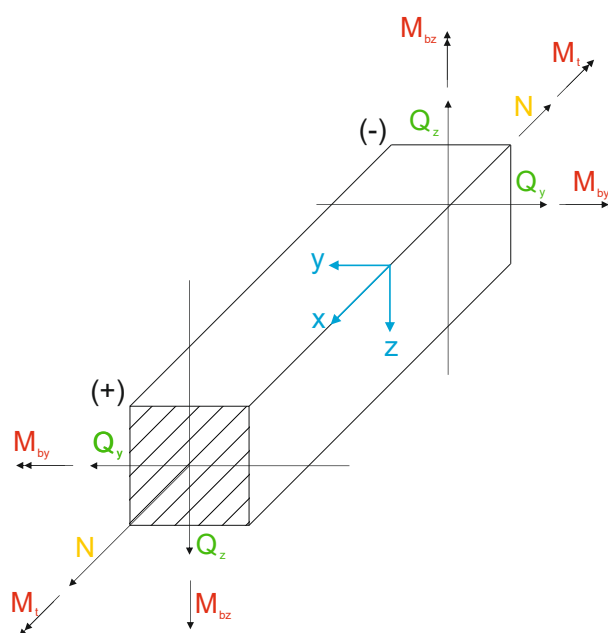


Abb. 4.1: Kräfte am geraden Balken (eigene Darstellung nach [12])

Flächenträgheitsmomente

Das Flächenträgheitsmoment oder auch Flächenmoment beschreibt den Ausdruck Abstand mal Flächenteilchen zur Bezugsachse, weshalb Flächenmomente stets mit Angabe der Bezugsachse gekennzeichnet werden. Abbildung 4.2 stellt ein solches Flächenteilchen dA innerhalb der Fläche A dar. Das Flächenmoment lässt sich bezüglich des kartesischen Bezugssystems (y,z) oder bezüglich des Flächenschwerpunkts SP im Bezugssystem (ξ,η) angeben.

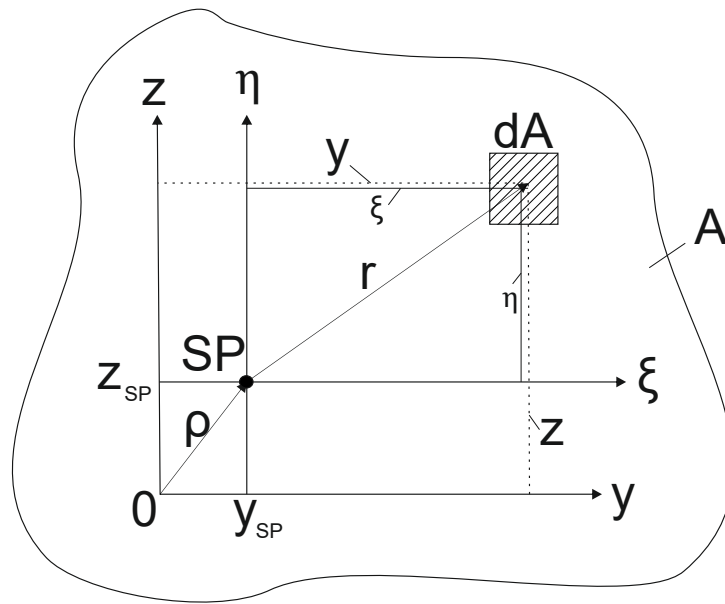


Abb. 4.2: Zur Ableitung der Flächenmomente auf Schwerpunkt- bzw. kartesisches Bezugssystem (eigene Darstellung nach [12])

Flächenträgheitsmomente erster Ordnung bezeichnen die statischen Momente. Aus ihrer Definition leitet sich die Lage des Schwerpunktes ab.

$$S_y = \int_A z \, dA, \quad S_z = \int_A y \, dA \quad (4.1)$$

Wird $y_{SP} = z_{SP} = 0$, weil Bezugspunkt und Schwerpunkt der Gesamtflächen zusammen fallen gilt:

$$\int_A \xi \, dA = 0, \quad \int_A \eta \, dA = 0 \quad (4.2)$$

Die statischen Momente sind in diesem Fall, bezogen auf die Achsen durch den Schwerpunkt einer Fläche, gleich null.

Flächenmomente zweiter Ordnung werden als axiale Flächenmomente bezeichnet. Sie errechnen sich wie folgt:

$$I_y = \int_A z^2 \, dA, \quad I_z = \int_A y^2 \, dA \quad (4.3)$$

Dabei entspricht bei der Berechnung von I_y z dem senkrechten Abstand des Elements dA zur y -Achse. Analog stellt y den senkrechten Abstand zur z -Achse bei der Berechnung von I_z dar.

Sind bei der Torsion wölbfreie Querschnitte vorhanden, erhält man aus der Addition beider Flächenmomente das polare Flächenmoment:

$$I_p = I_y + I_z = \int_A (z^2 + y^2) dA = \int_A r^2 dA \quad (4.4)$$

Die Berechnung von Flächenträgheitsmomenten für Profile aus beliebig zusammengesetzten Flächen kann mit Hilfe des Satzes von Steiner erfolgen. Dabei wird von einem um η bzw. ξ versetzten Koordinatensystem ausgegangen (siehe Abbildung 4.2).

$$y = y_{SP} + \xi, \quad z = z_{SP} + \eta \quad (4.5)$$

Nach Einsetzen von Gleichung 4.5 in 4.3 folgt:

$$I_y = \int_A (z_{SP} + \eta)^2 dA = z_{SP}^2 \int_A dA + 2z_{SP} \int_A \eta dA + \int_A \eta^2 dA \quad (4.6)$$

$$I_y = I_\xi + z_{SP}^2 \cdot A \quad \text{bzw.} \quad I_z = I_\eta + y_{SP}^2 \cdot A \quad (4.7)$$

So lässt sich exemplarisch das Flächenträgheitsmoment eines Doppel-T-Trägers, wie in Abbildung 4.3 gezeigt, folgendermaßen berechnen.

$$2 \left[\frac{b \cdot t_1^3}{12} + b \cdot t_1 \left(\frac{h_2}{2} \right)^2 \right] + \frac{t_2 \cdot h_1^3}{12} \quad (4.8)$$

Der Ausdruck $\frac{b \cdot t_1^3}{12}$ in Gleichung 4.8 entspricht dabei dem Flächenträgheitsmoment der gelb eingefärbten horizontalen Komponenten. Der zugehörige Steiner'sche Anteil wird durch den Ausdruck $b \cdot t_1 \left(\frac{h_2}{2} \right)^2$ beschrieben. Der Schwerpunkt des grau dargestellten Mittelträgers entspricht dem Gesamtschwerpunkt, sodass dieser keinen Steiner'schen Anteil besitzt und lediglich mit dem Ausdruck $\frac{t_2 \cdot h_1^3}{12}$ in die Gleichung eingeht.

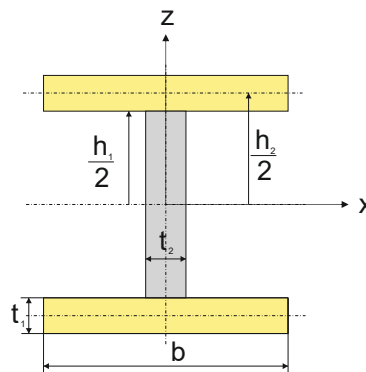


Abb. 4.3: Doppel-T-Träger aus drei zusammengesetzten Profilquerschnitten

Wie in Gleichung 4.3 zu erkennen ist, geht der Abstand der Fläche zur Bezugsachse quadratisch in das Flächenträgheitsmoment ein. Aus diesem Grund lassen sich hohe Trägheitsmomente erreichen, indem Material aus der Mitte des Bauteils in die Randbereiche verlagert wird. Ein prominentes Beispiel hierfür ist der in Abbildung 4.3 gezeigte Doppel-T-Träger, der oftmals im Bauwesen eingesetzt wird.

Noch konsequenter wird die Materialverlagerung in die Randbereiche bei der Sandwichbauweise durchgeführt. Ein Sandwich besteht üblicherweise aus zwei dünnen und festen Decklagen und einem dazwischen liegenden leichten, im Vergleich zu den Decklagen dickeren und weniger belastbaren Kernmaterial. Die Decklagen sind fest mit dem Kernmaterial verbunden, um bei verschiedenen Lastfällen Kräfte zwischen den Komponenten zu übertragen. Die beiden besonders relevanten Lastfälle Biegung und Schub sind im Folgenden für homogene Kerne dargestellt. Der in der Praxis seltene Lastfall der Zug-/Druckbeanspruchung wird an dieser Stelle nicht behandelt. Eine ausführliche Beschreibung sämtlicher Lastfälle ist im Buch Leichtbau-Konstruktion von B. Klein [1] ab S. 195 zu finden.

Biegebeanspruchung

Der bevorzugte Lastfall für Sandwichbauteile ist im Allgemeinen die Biegung. Auf die Breite b normiert, ergibt sich für das Biegemoment:

$$m_y = \frac{M_y}{b} = \int_{-(h+t)/2}^{(h+t)/2} \sigma_x \cdot z dz = -E \cdot I_y \cdot w'' \equiv -B_y \cdot w'' \quad (4.9)$$

- m_y Biegemoment um die y-Achse (auf Breite $b=1$ normiert)
- M_y Biegemoment
- b Breite
- σ_x Spannung in x-Richtung
- ϵ_x Dehnung in x-Richtung
- E E-Modul
- I_y Flächenträgheitsmoment bezogen auf die y-Achse
- w'' Krümmung des Sandwichbauteils (math. Ableitung des Steigungswinkels w' in der xz-Ebene)

Abbildung 4.4 stellt ein biegebeanspruchtes Sandwichelement und die durch den Lastfall resultierenden Spannungen dar.

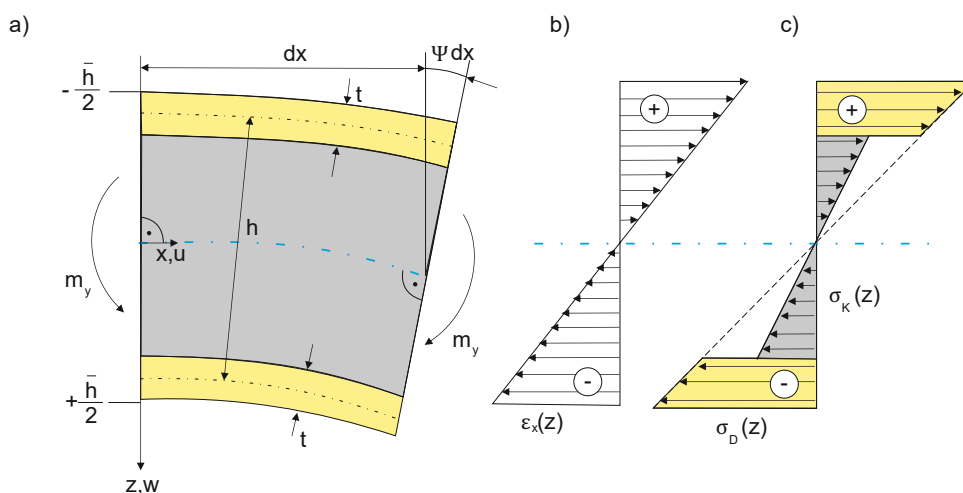


Abb. 4.4: Biegebeanspruchtes Sandwichelement mit bezogener Breite $b=1$ (eigene Abbildung nach [1])

Zu erkennen ist in Abbildung 4.4b eine linear zunehmende Dehnung $\epsilon_x(z)$ von der neutralen Faser (blaue Mittellinie) hin zum Rand des Sandwiches. Aufgrund der unterschiedlichen E-Moduln, ist jedoch die Spannung in den Decklagen $\sigma_D(z)$ deutlich höher als im Kern $\sigma_K(z)$ (siehe 4.4c). Die Spannung wird wie folgt berechnet:

$$\sigma_D(z) = -E_D \cdot z \cdot w'' \quad \text{und} \quad \sigma_K(z) = -E_K \cdot z \cdot w'' \quad (4.10)$$

Die Biegesteifigkeit ergibt sich aus:

$$B_y = \int_{-(h+t)/2}^{(h+t)/2} E \cdot z^2 dz = 2E_D \int_{(h-t)/2}^{(h+t)/2} z^2 dz + E_K \int_{-(h-t)/2}^{(h-t)/2} z^2 dz = \quad (4.11)$$

$$2E_D \left[\frac{z^3}{3} \right]_{(h-t)/2}^{(h+t)/2} + E_K \left[\frac{z^3}{3} \right]_{-(h-t)/2}^{(h-t)/2} = \frac{E_D}{12} [(h+t)^3 - (h-t)^3] + \frac{E_K}{12} (h-t)^3$$

B_y Biegesteifigkeit bezogen auf die y-Achse

E_D E-Modul der Decklagen

E_K E-Modul des Sandwichkerns

t Dicke der Decklagen

h Abstand zwischen Mitte-Decklage (oben) und Mitte-Decklage (unten)

Wird Gleichung 4.11 zusammengefasst, ergibt sich:

$$B_y = E_D \left(\frac{h^2 \cdot t}{2} + \frac{t^3}{6} \right) + \frac{E_K \cdot h_K^3}{12} \quad (4.12)$$

Basierend auf der Annahme, dass die Decklagen deutlich dünner als der Kern sind und über einen deutlich höheren E-Modul verfügen ($h \approx h_K$, $E_K \ll E_D$), kann bei Vernachlässigung der Eigenbiegesteifigkeit der Decklagen, für die Biegesteifigkeit des Sandwichverbundes folgende vereinfachte Formel angesetzt werden:

$$B_y \approx E_D \frac{h^2 \cdot t}{2} \quad (4.13)$$

Die vereinfachte Betrachtung gilt bereits als hinreichend gute Näherung für Verhältnisse $t/h < 1/4$ [1]. Abbildung 4.5 veranschaulicht exemplarisch den Einfluss der Kerndicke auf Biegefestigkeit und -steifigkeit bei einer Sandwichstruktur.

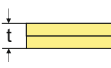
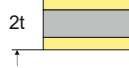
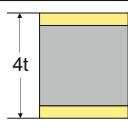
	Vollmaterial	Kerndicke t	Kerndicke $3t$
			
Biegesteifigkeit	1	7	37
Biegefestigkeit	1	3,5	9,2
Gewicht	1	1,03	1,06

Abb. 4.5: Auf das Vollmaterial bezogene mechanische Kennwerte und Gewichte von Sandwichstrukturen (eigene Darstellung nach [13])

Schubbeanspruchung

Neben der Biegebeanspruchung stellt die Schubbeanspruchung einen weiteren wichtigen Lastfall dar, wobei Biegung stets auch eine Schubbeanspruchung im Sandwichaufbau zur Folge hat, wie in Abbildung 4.6 zu erkennen ist.

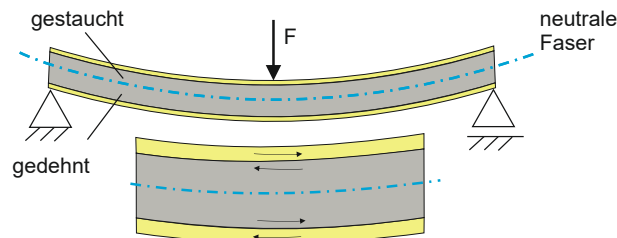
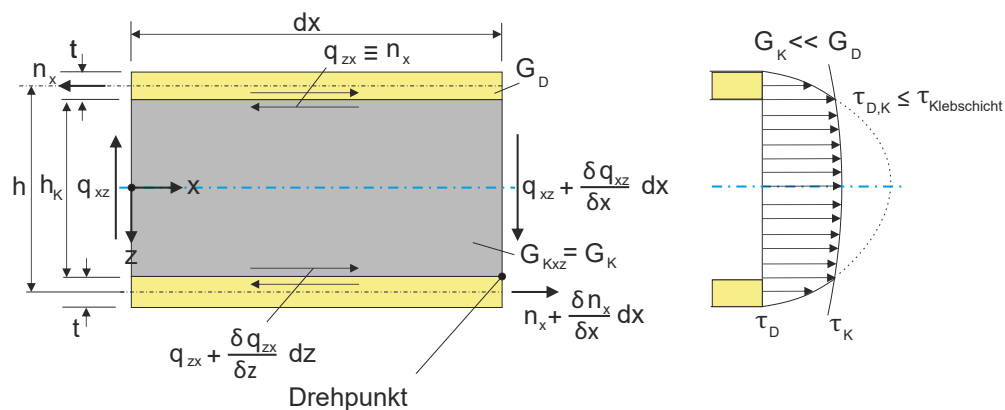


Abb. 4.6: Schubbeanspruchung durch Querkraftbiegung

Die Schubbeanspruchung im Sandwich ist in Abbildung 4.7 detailliert dargestellt.

a)



b)

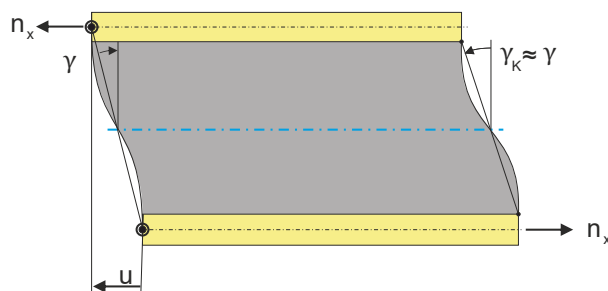


Abb. 4.7: Sandwichelement unter kritischem Schub mit bezogener Breite $b=1$ (eigene Darstellung nach [1])

- a) Belastungs- und Beanspruchungszustand
b) Verzerrungszustand

G_D Schubmodul der Deckschichten
 G_K Schubmodul des Kernwerkstoffs
 h_K Höhe des Kerns

Zwischen der auftretenden Verschiebung u und dem in den Decklagen angreifenden Kräftepaar n_x besteht folgende proportionale Beziehung.

$$n_x = \frac{G_K \cdot dx}{h_K} \cdot u \quad \text{bzw.} \quad c = \frac{G_K \cdot dx}{h_K} \quad (4.14)$$

c beschreibt dabei die Federsteifigkeit des Materials

Aus der Verformungsgeometrie folgt:

$$u = h_k \cdot \gamma_K \quad (4.15)$$

Die Schubsteifigkeit ergibt sich aus:

$$S_x = \frac{c \cdot h_K^2}{dx} = \frac{G_K \cdot dx}{h_K} \cdot \frac{h_K^2}{dx} = G_K \cdot h_K \quad (4.16)$$

Der Spannungsverlauf im Sandwich kann mit folgenden Gleichungen beschrieben werden:

Schubspannungsverlauf in den Decklagen im Bereich $(h - t)/2 \leq z \leq (h + t)/2$:

$$\tau_{xz}(z)_D = \frac{q_{xz}}{B_y} \cdot E_D \cdot \int_z^{(h+t)/2} z dz + C_D = \frac{q_{xz}}{B_y} \cdot E_D \left[\frac{(h+t)^2}{8} - \frac{z^2}{2} \right] + C_D \quad (4.17)$$

Da die Schubspannung am äußeren Rand $z = (h + t)/2 = 0$ ist, folgt daraus dass auch die Integrationskonstante $C_D = 0$ ist.

Schubspannungsverlauf im Kernbereich $0 \leq z \leq \frac{(h_K)}{2}$:

$$\tau_{xz}(z)_K = \frac{q_{xz}}{B_y} \cdot \left[E_K \cdot \left(\frac{(h_K)^2}{8} - \frac{z^2}{2} \right) + E_K \frac{h \cdot t}{2} \right] \quad (4.18)$$

Die vollständigen Herleitungen der Gleichungen 4.16 sowie 4.17 und 4.18 sind im Buch „Leichtbau-Konstruktion“ von B. Klein [1] ab S. 198 zu finden.

4.1.2 Übersicht verschiedener Kernmaterialien

Wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, bietet die Sandwichbauweise enormes Potential zur Herstellung leichter und gleichzeitig steifer Bauteile. Das zwischen den Decklagen liegende Kernmaterial hat dabei wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften der Sandwiches. Neben den mechanischen Eigenschaften des Kernmaterials sind auch weitere Aspekte bei der Auswahl geeigneter Kernwerkstoffe zu berücksichtigen. Je nach Anwendungsbereich müssen Sandwichverbunde bestimmte Vorgaben erfüllen. So zählen beispielsweise neben niedriger Dichte des Kernmaterials eine geringe Wasseraufnahme, gute Korrosionsbeständigkeit oder schwere Entflammbarkeit des Verbundes zu wichtigen Auswahlkriterien. Besonders im Flugzeugbau werden hohe Anforderungen an die Brandeigenschaften von Materialien gestellt und je nach Hersteller oder Behörde existieren umfangreiche Regelwerke, mit verschiedenen Brandtests nach denen die Materialien untersucht werden. So soll sichergestellt werden, dass sich im Falle eines Brandes das Feuer nicht zu schnell oder im besten Fall gar nicht ausbreitet, keine giftigen Gase freigesetzt werden oder schmelzendes Material nicht abtropft. Eine Übersicht über die Brandtests der „Federal Aviation Administration“ (FAA) findet sich im „Aircraft Materials Fire Test Handbook“ [14].

Eine Übersicht wichtiger Kriterien zur Auswahl eines geeigneten Kernmaterials ist im Folgenden aufgelistet:

- Dichte
- Schubfestigkeit
- Druckfestigkeit
- Anbindung an die Decklagen
- Kosten
- Drapierbarkeit / Formbarkeit
- Chemische Beständigkeit
- Feuchtebeständigkeit
- Korrosionsbeständigkeit
- Brandeigenschaften
- Wärmeleitfähigkeit
- Akustische Eigenschaften
- Möglichkeit zur Funktionsintegration
- Rezyklierbarkeit

„The Handbook of Sandwich Construction“ teilt Kernmaterialien in drei Hauptgruppen ein. Wellkerne, Honeycomb und Zellmaterial bzw. Balsaholz [15].

Aufgrund der Entwicklung weiterer Kernmaterialien in den letzten Jahren sowie einer stärkeren Differenzierung der etablierten Kernwerkstoffe werden die verschiedenen Kernmaterialien in der vorliegenden Arbeit in insgesamt zehn Kategorien klassifiziert und bilden somit den Markt an verfügbaren Materialien sehr gut ab. Das aktuelle Kapitel gibt einen Überblick über verschiedene, teilweise kommerziell erhältliche Materialien und geht auf deren charakteristische Eigenschaften ein.

Balsaholz

Balsaholz ist ein natürliches Zellmaterial, welches im Vergleich zu anderen Kernmaterialien eine sehr gute spezifische Steifigkeit und Festigkeit sowie herausragende Eigenschaften hinsichtlich der Energieabsorption aufweist. Bei axialer Belastung gleichen sich die spezifische Energieabsorption von Balsaholz und der hexagonalen Honeycomb [16]. Diese Charakteristika resultieren aus der Mikrostruktur des Materials, welche aus axial angeordneten langen schlanken Zellen (Tracheen) mit näherungsweise hexagonalem Querschnitt besteht. Die Dichte von Balsaholz liegt zwischen 40 kg/m^3 und 380 kg/m^3 . Wie alle Hölzer ist Balsaholz stark anisotrop, wobei das Holz in Längs- bzw. Wuchsrichtung deutlich steifer und fester ist als in Querrichtung.

Wie auch bei Schaumkernen lässt sich bei Sandwichkernen aus Balsaholz eine flächige Anbindung der Decklagen an das Kernmaterial realisieren (s. Abbildung 4.8). Die Druckfestigkeit liegt bei Balsaholz jedoch deutlich höher als beispielsweise bei PVC-Schäumen vergleichbarer Dichte [17]. Kerne aus Balsaholz kommen vor allem im Schiff- und Bootsbau, bei Schienen- und Straßenfahrzeugen, aber auch bei Windkraftanlagen oder in der Luftfahrt zum Einsatz. Für den Einsatz in Verkehrsflugzeugen ist das Kernmaterial aufgrund seiner Brennbarkeit jedoch nicht geeignet. Kommerziell ist das Holz beispielsweise unter dem Produktnamen „BALTEK“ erhältlich. Der sehr breite Einsatztemperaturbereich dieses Materials wird im Datenblatt mit $-212 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $+163 \text{ }^\circ\text{C}$ angegeben [18].



Abb. 4.8: Balsaholz als Kernmaterial

Abstandsgewebe

Abstandsgewebe unterscheiden sich von anderen Kernmaterialien dahingehend, dass die Decklagen bereits integriert sind. Während es sich bei Schäumen, Tubus-, Honeycomb- oder Noppenwaben um reine Kernmaterialien handelt, die ihre Funktionalität im Sandwichverbund erst durch das Aufbringen der Decklagen erreichen, bestehen konventionelle Abstandsgewebe aus zwei Gewebelagen, die durch Polfäden miteinander verbunden sind [19] (s. Abbildung 4.9). Der Abstand zwischen den beiden Gewebelagen kann hierbei variiert werden.

Abstandsgewebe sind der Gruppe der 3D-Gewebestrukturen zugeordnet. Aus diesen Geweben hergestellte Verbundwerkstoffe weisen bessere Out-of-Plane-Eigenschaften als herkömmliche Verbunde auf und zeichnen sich durch eine wesentlich höhere Delaminationsfestigkeit und Energieabsorption bei Impact- und Crash-Beanspruchung aus [19]. Im Gegensatz zu anderen Sandwichverbunden sind bei dieser Art von Textilkernen Kernmaterial und Decklagen nicht als solches trennbar, da die stützenden Fäden in z-Richtung stets mit oberer und unterer Gewebelage fest verbunden sind [19].

Abstandsgewebe kommen überwiegend bei preiswerten Sandwich-Verbunden zum Einsatz, z.B. im Bootsbau, bei LKW-Aufbauten oder Verkleidungselementen wo das Gewicht, anders als in der Luft- und Raumfahrt, eine untergeordnete Rolle spielt.

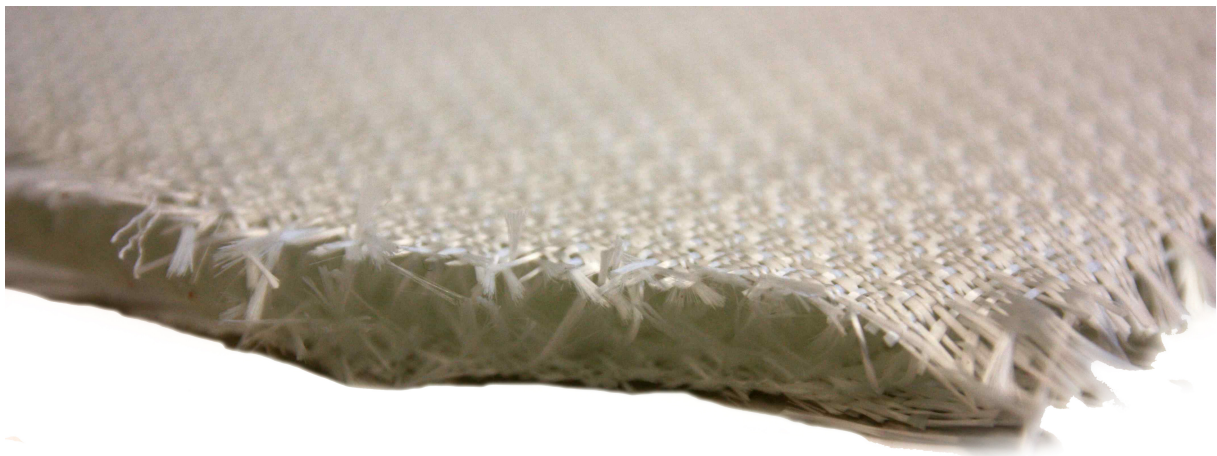


Abb. 4.9: Abstandsgewebe als Kernmaterial

Wellkern (Corrugated Core)

Wellkerne stützen die Decklagen linienförmig in einer Richtung (s. Abbildung 4.10). Das Kernmaterial lässt sich auf einfache Weise kontinuierlich in hoher Geschwindigkeit herstellen und ist aus diesem Grund besonders kostengünstig. Wellpappe wie sie oftmals für Verpackungen zum Einsatz kommt, stellt hierbei eine häufige Anwendung dieses Sandwich-Verbundes dar. Vorteile, wie geringes Gewicht, Rezyklierbarkeit und geringe Kosten machen dieses Produkt besonders attraktiv für Transportverpackungen [20]. Neben Karton werden auch andere Materialien, wie Metalle [21], verarbeitet. Auch sind Verbunde mit Decklagen aus Metall möglich und kommen in dieser Form beispielsweise im Bauwesen zum Einsatz. Im Vergleich zu anderen Kernmaterialien sind die mechanischen Eigenschaften der Sandwich-Bauteile, speziell senkrecht zu den Stützlinien, deutlich schlechter. Aufgrund des niedrigen Preises sind gewellte Kernmaterialien überall dort weit verbreitet, wo hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften Abstriche im Vergleich zu leistungsfähigeren aber auch teureren Kernmaterialien in Kauf genommen werden können.

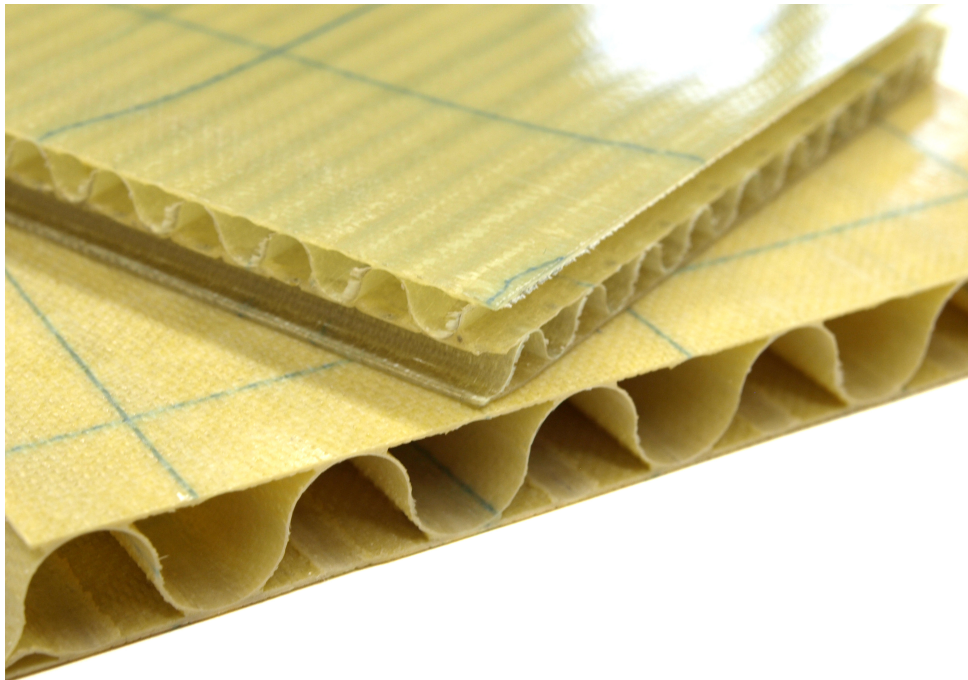


Abb. 4.10: Wellkern als Kernmaterial (Bauteile mit freundlicher Unterstützung von der InnoMat GmbH zur Verfügung gestellt)

Faltwabe

Die Faltwabe ist ein origamiartig gefaltetes Kernmaterial, welches durch Falten eines ebenen Materials in eine dreidimensionale Struktur erzeugt wird [22]. Die Faltung, vorzugsweise ohne zusätzliche Dehnung, Schnitte oder Verklebungen, ist eine weitgehend verformungsfreie und damit materialschonende Herstellungsmethode [23]. Die Wabenstruktur stellt hinsichtlich der Geometrie eine Mischung aus gewellten Kernen und zelligen Wabenformen dar. Wie bei der Honeycomb werden die Decklagen sowohl in x- als auch in y-Richtung gestützt. Allerdings stehen die Zellwände im Gegensatz zur Honeycomb nicht alle senkrecht zur Plattenebene (s. Abbildung 4.11).

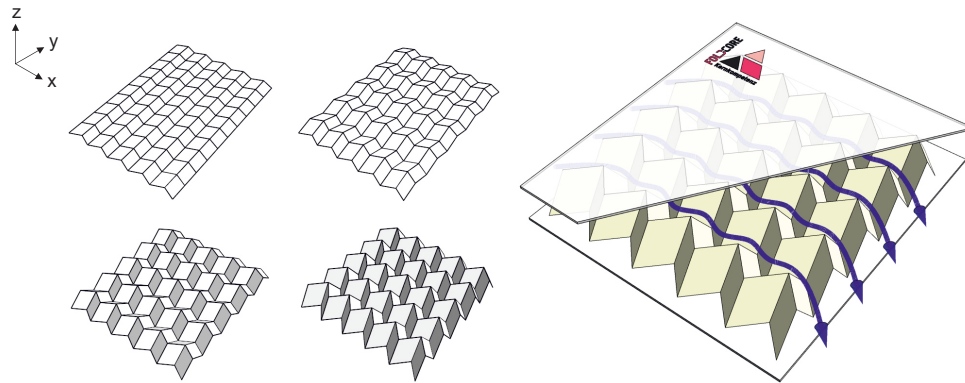


Abb. 4.11: Falten des flachen Ausgangsmaterials in eine dreidimensionale Faltwabe (Quelle: Foldcore GmbH)

Das Material kann um zwei (2-HAP) oder drei (3-HAP) Achsen gefaltet werden. Abbildung 4.12 zeigt eine Faltung um 3 Achsen. Beide Varianten lassen sich auch zu einer sinusförmigen Faltung abwandeln. Darüber hinaus können die mechanischen Eigenschaften durch Variation der Zellgröße und des eingesetzten Materials auf die jeweilige Anwendung angepasst werden [22]. Die offene Struktur der Faltkerne ermöglicht zudem die Integration weiterer Funktionen, wie z.B. Belüftung, Klimatisierung oder Drainage. Nachteilig ist die eingeschränkte Drapierbarkeit des Materials. Krümmungen müssen bereits beim Falten berücksichtigt werden und lassen dann auch nur diese Geometrie zu. So lässt sich ein Wabenmaterial herstellen, welches beispielsweise zylindrisch in einem vorher festgelegten Radius gefaltet werden kann. Es jedoch nicht möglich eine solche Faltwabe ohne Beschädigung der Wabenstruktur für ebene Bauteile zu verwenden. Umfassende Informationen über verschiedene Varianten von Faltkernen, deren Auslegung und Herstellung gibt Yves Klett in seiner Dissertation „Auslegung multifunktionaler isometrischer Faltstrukturen für den technischen Einsatz“ [23].

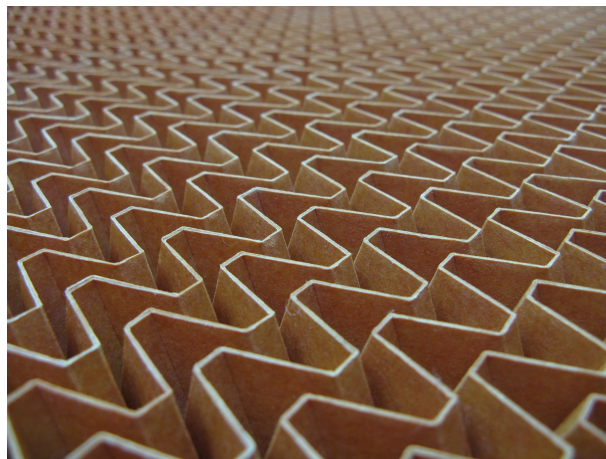


Abb. 4.12: Faltwabe als Kernmaterial (Quelle: Foldcore GmbH)

Faltwaben kommen bislang nur begrenzt zum Einsatz. Im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte konnte die prinzipielle Eignung des Materials für Rumpfschalen im Flugzeugbau nachgewiesen werden, auf dem Autosalon in Genf 2011 wurde der Mini Rocketman mit Faltwaben im Türbereich und Armaturenräger gezeigt [23]. Ein Einsatz des Kernmaterials in der Serienfertigung ist nicht bekannt.

Fachwerkkern (Truss Core)

Bei truss cores handelt es sich um eine offene Struktur, deren Geometrie stark vereinfacht und auf skelettartige einzelne Träger reduziert ist, welche die Decklagen punktuell stützen. Fachwerkkerne stellen eine relativ neue Variante von Kernmaterialien mit hohem multifunktionellen Potential bei gleichzeitig geringem spezifischen Gewicht dar [24]. Gängige Materialien für derartige Fachwerkkerne sind Metalle und carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) [25]. Eine Vielzahl verschiedener Fachwerkstrukturen, wie beispielsweise Blockgitter, pyramidal, tetraedrisch oder kagome (s. Abbildung 4.13) bieten hierbei vielversprechende Ansätze, sehr gute mechanische Eigenschaften mit weiteren Funktionen, wie z.B. Wärmeableitung oder Energieabsorption zu vereinen [26].

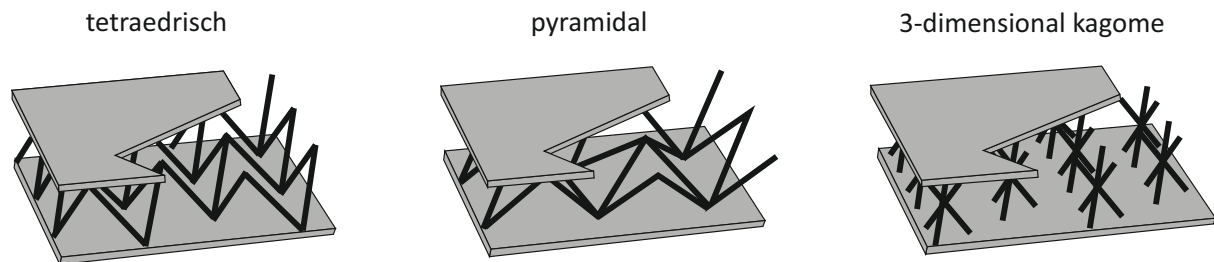


Abb. 4.13: Fachwerkkerne mit verschiedenen Fachwerkstrukturen (eigene Darstellung nach [27])

Truss cores aus CFK bewegen sich hinsichtlich ihrer mechanischen Kennwerte in etwa auf dem Niveau der vielfach eingesetzten Honeycomb. Bei vorgegebenen Randbedingungen hinsichtlich einer zu erreichenden Schub- und Biegefestigkeit besitzt die Honeycomb einen leichten Gewichtsvorteil, sofern die Druckfestigkeit nur eine untergeordnete Rolle spielt. Im Gegenzug haben truss cores aufgrund ihrer Geometrie Vorteile bei Druckbeanspruchung, sodass sich das Verhältnis umkehrt, sobald eine höhere Druckfestigkeit als Bedingung gefordert wird [24].

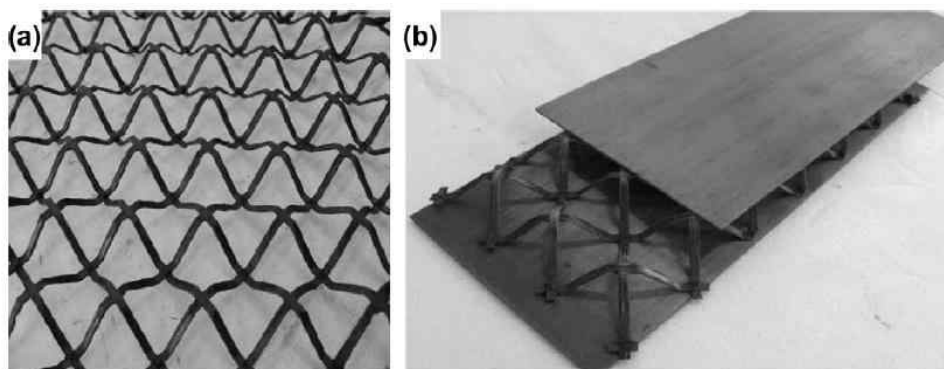


Abb. 4.14: a) Pyramidaler CFK-Fachwerkkern b) Sandwich mit pyramidalem CFK-Fachwerkkern (Quelle: Composites Part B [28])

Die Herstellung der Fachwerkkerne ist relativ aufwändig und kommerziell erhältliche Produkte dieses Kernmaterials aus CFK sind derzeit nicht verfügbar.

Tubuskern

Tubuskern bestehen aus nebeneinander angeordneten Röhren, die in der Regel extrudiert, in der Länge auf die Höhe des Sandwichkerns zugeschnitten und an den Mantelaußenflächen miteinander verklebt oder verschmolzen sind. So lässt sich eine Geometrie erzeugen, die der sechseckigen Honeycomb ähnlich ist, jedoch aus nebeneinander angeordneten Rundelementen in der dichtestmöglichen Anordnung besteht (s. Abbildung 4.15). Variationen sind hinsichtlich Tubusdurchmesser, Wandstärke, Material und Kernhöhe möglich, sodass sich die Eigenschaften des Kernmaterials in einem weiten Bereich einstellen lassen. So besitzen beispielsweise die Waben von Tubus Bauer eine Dichte zwischen 48 kg/m^3 und 200 kg/m^3 bei einer Zellweite zwischen 2,5 mm und 12 mm [29].

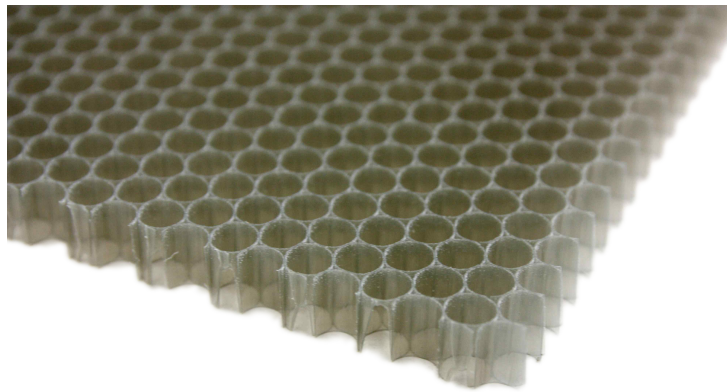


Abb. 4.15: Tubuswabe als Kernmaterial

Tubus-Waben sind vor allem für den Einsatz im Fahrzeug- und Schiffsbau geeignet und zeichnen sich durch geringe Wasseraufnahme und Korrosionsfreiheit aus. Aufgrund ihrer Brennbarkeit sind die thermoplastischen Waben aus den gängigen Materialien (Polypropylen, Polycarbonat) nicht für den Einsatz in der personenbefördernden Luftfahrt geeignet.

Honeycombs in verschiedenen Varianten

Honeycombs werden in zahlreichen Anwendungen als Kernmaterial in Sandwichpanels eingesetzt und können aus verschiedenen Materialien hergestellt werden. Der Großteil der kommerziell erhältlichen Wabenmaterialien besteht aus Aluminium, Polypropylen (PP) oder aus mit Phenolharz imprägniertem Nomex®- oder Kevlar®-Papier.

Das Kernmaterial besteht aus senkrecht stehenden, miteinander verbundenen Zellwänden. Am meisten verbreitet sind Varianten mit hexagonalen Zellen (s. Abbildung 4.16), jedoch existieren auch Honeycombs mit anderen, in Abbildung 4.17 dargestellten, Zellstrukturen.

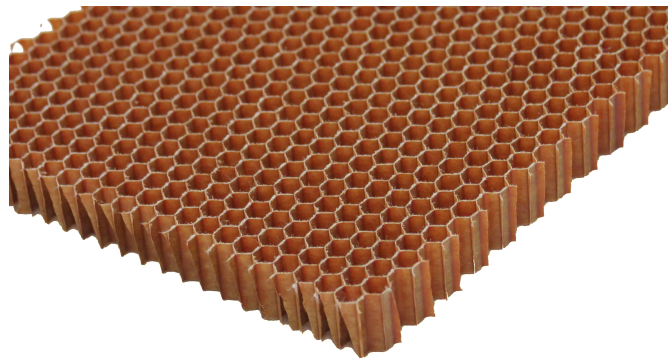


Abb. 4.16: Honeycomb aus Nomex® -Papier

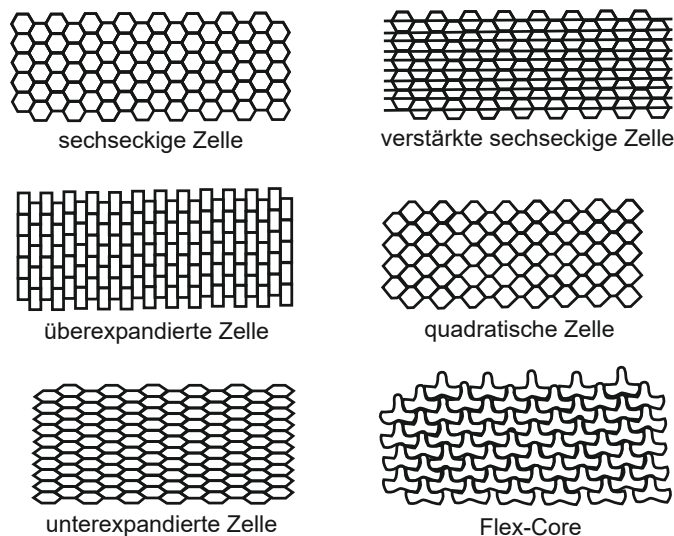


Abb. 4.17: Verschiedene Zellstrukturen der Honeycomb (eigene Darstellung nach [30])

Die geschlossene Struktur der Honeycombs kann zum Einschluss und zur Ansammlung von Kondenswasser in einem Sandwichpanel führen, wodurch das Gewicht erhöht wird und die mechanischen Eigenschaften geschwächt werden [9, 10]. Vor allem bei Raumfahrtanwendungen sind Lufteinschlüsse in den Zellen nachteilig, da der im Panel entstehende Überdruck im Vakuum zur Delamination führen kann. Daher sind auch Varianten mit perforierten Zellwänden erhältlich [31, 32], um einen Medienaustausch zwischen den Zellen zu ermöglichen. Wie in Abbildung 4.16 zu erkennen ist, erfolgt die Anbindung an die Decklagen in Form dünner Stege, welche durch die Zellwände gebildet werden.

Im Vergleich zu anderen Kernmaterialien zeichnet sich die hexagonale Zellstruktur aufgrund der gegenseitigen Abstützung der Zellwände durch eine hohe spezifische Druckfestigkeit in der Materialebene sowie eine hohe Biegesteifigkeit aus [33]. Aus diesem Grund werden Honeycombs bevorzugt für Anwendungen mit hohen Anforderungen an Gewicht und mechanische Eigenschaften eingesetzt, wie sie beispielsweise im Bereich der Luft- und Raumfahrt zu finden sind. Beispielhaft sind hier die mechanisch belasteten Bauteile wie Bodenpanel oder Overhead Storage Compartment in der Flugzeugkabine zu nennen. Jedoch werden auch mechanisch nicht belastete Elemente wie Dado-, Sidewall- oder Ceiling-Panel mit Honeycombs als Kernmaterial hergestellt. Aufgrund der guten Flammfestigkeit werden für die genannten Bauteile Waben aus Nomex®-Papier eingesetzt. Das Kernmaterial ist kommerziell in einer Vielzahl von Varianten mit unterschiedlichen Materialien, Zellweiten, Dichten und Höhen erhältlich. Die Zellweite ist hierbei wie in Abbildung 4.18 zu sehen definiert.

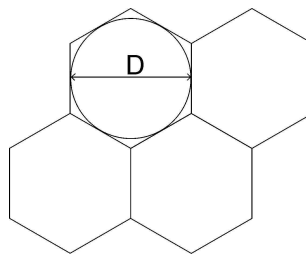


Abb. 4.18: Zellweite D der Honeycomb

Der Großteil der kommerziell erhältlichen Waben besteht aus Aluminium, Nomex®, Kevlar® oder Polypropylen. Allen hexagonalen Honeycombs gemeinsam ist die eingeschränkte Drapierbarkeit bzw. Sattelform bei zylindrischer Krümmung. Die sich bildende Sattelform bei Krümmung dieser Honeycombvariante ist in Abbildung 4.19 dargestellt.

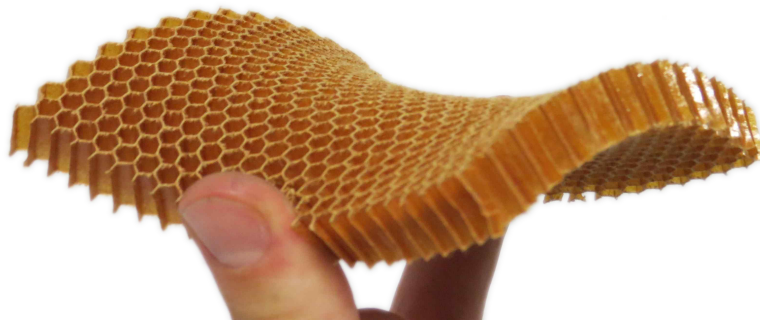


Abb. 4.19: Sich ausbildende Sattelform bei zylindrischer Krümmung der Honeycomb

Aus diesem Grund sind weitere Varianten wie z.B. über- oder unterexpandierte Waben erhältlich, welche deutlich besser die Form derartiger Konturen annehmen (s. Abbildung 4.17), um eine Sattelform bei gekrümmten Flächen zu vermeiden.

Abbildung 4.20 zeigt sowohl eine hexagonale als auch eine überexpandierte Honeycomb, meist als OX (engl. overexpanded) gekennzeichnet, in gekrümmter Form. Hierbei ist zu sehen, dass sich die überexpandierte Wabe (links) deutlich besser an die zylindrische Form anpasst als die hexagonale Variante (rechts), welche sich nur unter Beschädigung der Wabenstruktur in gekrümmte Form bringen lässt.

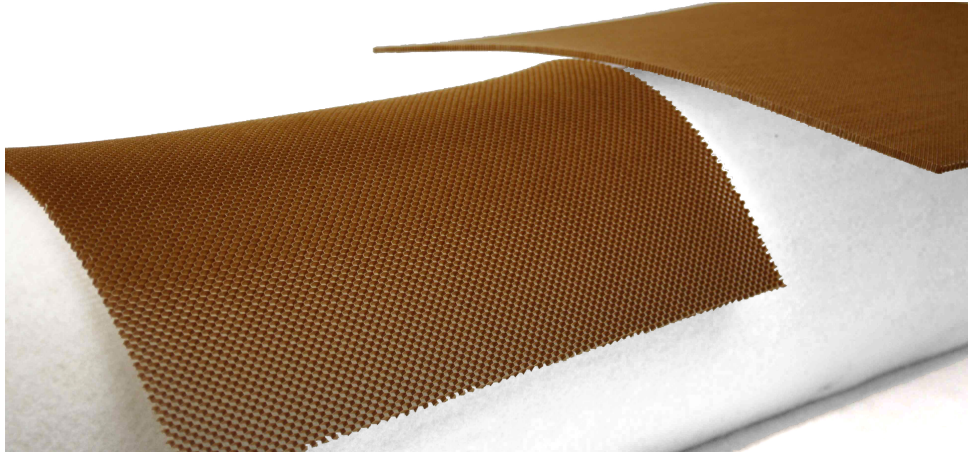


Abb. 4.20: links: Überexpandierte Honeycomb in gekrümmter Form
rechts: Klassische Honeycomb lässt sich nicht ohne Beschädigung krümmen

Honeycombs aus Aluminium werden überwiegend aus drei Legierungstypen bestehend angeboten. Es handelt sich um die Legierungen 3000, 5052 und 5056, wobei die beiden letztgenannten für den Einsatz in der Luft- und Raumfahrt zugelassen sind. Mit der Legierung 5056 werden etwas höhere mechanische Kennwerte erreicht als mit der Legierung 5052. Außerdem verfügt die Legierung 5056 über eine besonders hohe Korrosionsbeständigkeit [34]. Abbildung 4.21 stellt die Druckfestigkeit der drei Legierungstypen mit einer Zellweite von 1/4" (6,4 mm) in Abhängigkeit vom Raumgewicht in einem Diagramm dar. Die Kennwerte wurden aus den Datenblättern übernommen und beziehen sich auf Messungen mit stabilisierten Kernmaterialien, d.h. unter Verwendung von Decklagen.

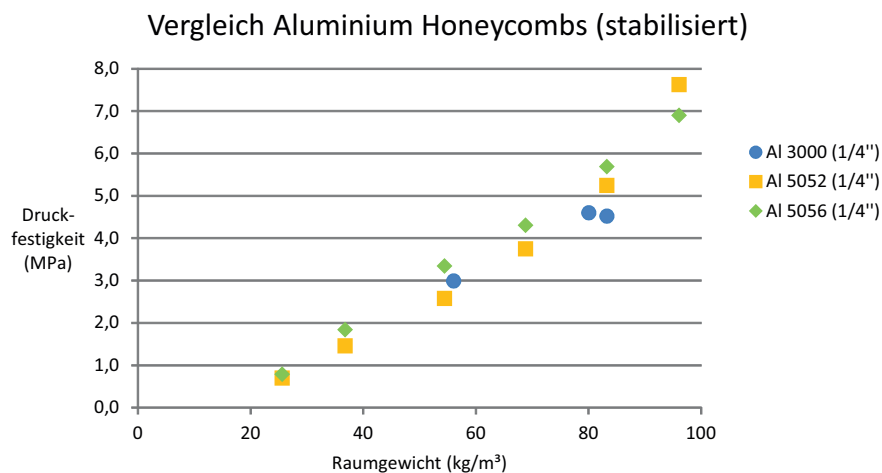


Abb. 4.21: Druckfestigkeit verschiedener Aluminium-Honeycombs bei gleicher Zellweite 1/4" (6,4 mm) in Abhängigkeit vom Raumgewicht (Quelle: InnoMat GmbH [34])

Einen ähnlichen Zusammenhang zwischen Raumgewicht und Druckfestigkeit zeigt Abbildung 4.22 mit Honeycombs aus Nomex®-Papier (meta-Aramid). Diese Waben sind ab 24 kg/m^3 in Zellgrößen zwischen 3,2 und 9,5 mm erhältlich.

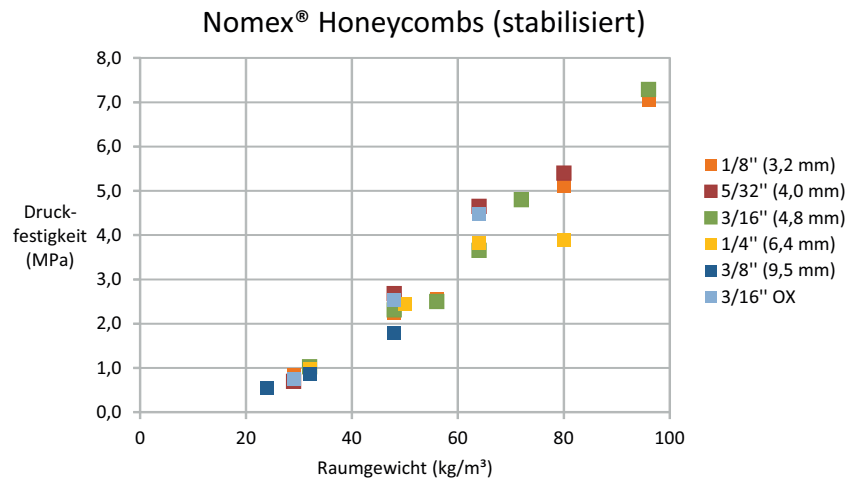


Abb. 4.22: Druckfestigkeit verschiedener Nomex®-Honeycombs in Abhängigkeit vom Raumgewicht (Quelle: InnoMat GmbH [34])

Abbildung 4.23 zeigt die direkt proportionale Abhängigkeit der Druckfestigkeit vom Raumgewicht, bei Aluminium- und Nomex®-Honeycombs gleicher Zellweite. Beide Materialien erzielen bei Druckbeanspruchung ähnliche Werte bei vergleichbarem Raumgewicht [34].

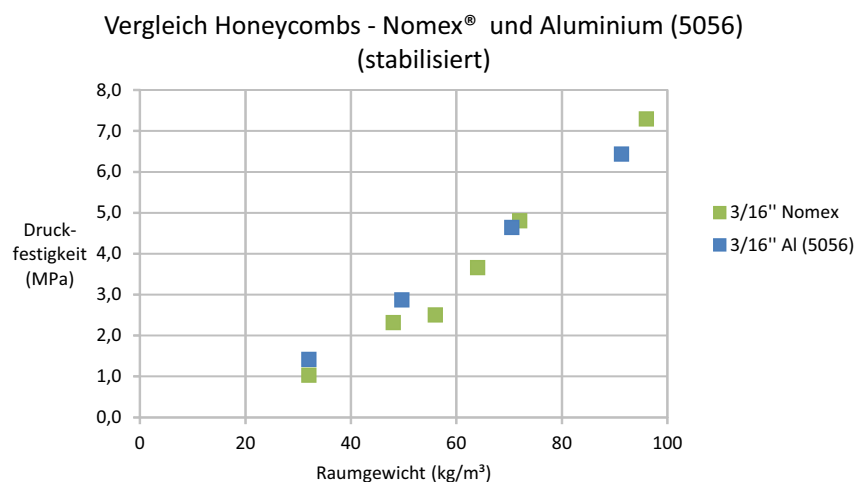


Abb. 4.23: Druckfestigkeiten in Abhängigkeit vom Raumgewicht von Al- und Nomex®-Honeycombs im Vergleich (Quelle: InnoMat GmbH [34])

Neben den soeben beschriebenen Varianten existiert noch eine Vielzahl von Honeycombs für Spezialanwendungen aus z.B. kohlenstoff- oder glasfaserverstärktem Kunststoff, Stahl, Quarz, Papier oder unverstärkten thermoplastischen Kunststoffen (z.B. PP, Polycarbonat (PC), Polyetherimid (PEI)) [34].

Bei „Acousti-Core“ von Hexcel handelt es sich um eine Honeycomb-Variante mit verbesserten akustischen Eigenschaften, die Quarz-Honeycombs von Ultracor können aufgrund ihrer geringen dielektrischen Eigenschaften als nichtleitendes Material für spezielle Radaranwendungen genutzt werden und CFK-Honeycombs haben bereits bei sehr geringen Raumgewichten deutlich höhere Druckfestigkeitskennwerte als Nomex®- oder Kevlar®-Varianten.

Die hohen Druckfestigkeiten sämtlicher Honeycombs ergeben sich aus der für diese Belastung sehr gut geeigneten Struktur mit hexagonal angeordneten Zellwänden. Da sämtliche Zellwände orthogonal zur Sandwichebene stehen, kann die Belastung im Druckversuch bestmöglich aufgenommen werden. Weiterhin stabilisieren sich die Waben gegenseitig gegen Ausknicken.

Trotz sehr guter mechanischer Eigenschaften ist der Einsatz von Honeycombs begrenzt, da die Herstellung im Vergleich zu anderen Kernmaterialien deutlich aufwändiger ist, was einen vergleichsweise hohen Preis zur Folge hat. So werden die weit verbreiteten Nomex® Honeycombs, wie in Abbildung 4.24 dargestellt, zu Blöcken verklebt, auf die Dicke des Kernmaterials zugeschnitten, expandiert und anschließend mit Harz imprägniert.

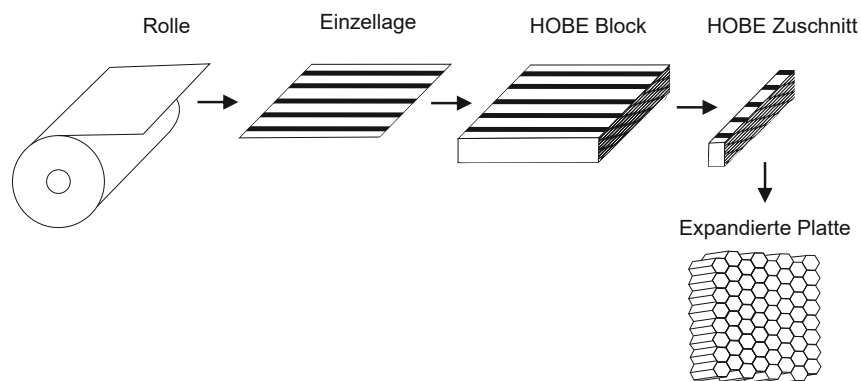


Abb. 4.24: Schematischer Herstellungsprozess von Nomex®-Honeycombs (eigene Darstellung nach [35])

Die Imprägnierung der Waben erfolgt im Tauchverfahren in mehreren Durchgängen bis das gewünschte Raumgewicht erreicht ist. In der Regel sind zwei bis drei Durchgänge notwendig, in einigen seltenen Fällen wird das Kernmaterial jedoch auch in bis zu 30 Durchgängen imprägniert [35]. Das imprägnierte Wabenmaterial wird im Anschluss im expandierten Zustand im Ofen getrocknet.

In Kapitel 7 werden leichte Nomex®-Honeycombs (C1 3,2-29) (Luftfahrtqualität C1, Zellweite 3,2 mm, Raumgewicht 29 kg/m³) als Referenz für vergleichende Messungen (Druck-, Schub-, Biegefestigkeit) zwischen Noppenwaben und etablierten Kernwerkstoffen herangezogen. Vergleichende Impact-Untersuchungen werden mit einer schwereren Wabe (C2 3,2-48) (Industriequalität C2, Zellweite 3,2 mm, Raumgewicht 48 kg/m³) durchgeführt.

Hybridmaterial (Schaum mit Versteifungen, Schaumgefüllte Honeycomb)

Neben den klassischen Kernmaterialien bietet der Markt auch Hybridmaterialien, welche verschiedene Kernmaterialien kombinieren und deren Vorteile vereinen. Beispiele hierfür sind verstärkte Schäume, in die Versteifungen eingebracht werden, um die Druckfestigkeit zu erhöhen. NidaFusion STO Composite Panels besitzen einen Schaumkern mit gestickten Verstärkungen aus Glas-, Aramid-, oder Kohlenstofffaser. Die Verstärkungen verlaufen schräg (ca. 45°) zwischen den Decklagen und bilden nach dem Infiltrieren mit Harz im Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding (VARTM)-Prozess, ein im ausgehärteten Zustand stabilisierendes Fachwerk. So ergibt sich gegenüber einem reinen Schaumkern ein Panel mit verbesserten mechanischen Eigenschaften und vergleichbarem thermischen Isolationsverhalten [36].

Verbreitet sind ebenfalls verstärkte Honeycombs, wie in Abbildung 4.25 beispielhaft zu sehen ist. Die eingebrachte Spachtelmasse dient der lokalen Verstärkung an Ecken und Kanten sowie im Bereich von Inserts [37]. Ebenso existieren Anwendungen, bei denen Honeycombs gefüllt werden, um die akustischen Dämpfungseigenschaften zu verbessern [38].



Abb. 4.25: Honeycomb mit eingebrachter Verstärkung im Randbereich eines Panels (Teil eines Airbus A320 - DADO-Panels)

Schaumkern

Schäume sind definitionsgemäß Dispersionen von relativ großen Gasvolumina in einem relativ kleinen Flüssigkeitsvolumen [39]. Als Schaumstoffe werden nach DIN 7726 Zwei-Phasen-Systeme bezeichnet, bei denen ein Gas in einer kontinuierlichen, festen Matrix dispergiert ist. Der Zusatz „Stoff“ soll dabei auf den Werkstoffcharakter des zelligen Materials hinweisen. Die Norm definiert Schaumstoffe als „Werkstoffe mit einer über die gesamte Masse verteilten Zellen (offen, geschlossen oder beides) und einer Rohdichte (DIN 53420), die niedriger ist, als die Dichte der Gerüstsubstanzen“ [39]. Schaumstoffe lassen sich unter anderem aus Thermoplasten, Duroplasten und Elastomeren herstellen. Schaumstoffe als Kernmaterial erscheinen bei makroskopischer Betrachtung wie ein Vollmaterial und erleichtern die Herstellung von Sandwichelementen. Zum einen lassen sich Schäume vergleichsweise einfach in Form bringen, zum anderen lassen sich mehrere Schaumblöcke ohne Probleme miteinander verkleben. Vorteilhaft ist auch die relativ homogene, flächige Anbindung an die Decklagen [11], wie in Abbildung 4.26 zu erkennen ist.



Abb. 4.26: Schaumkern als Kernmaterial

Schäume verschiedener Materialklassen sind über ein weites Spektrum hinsichtlich Dichte, Festigkeit und Temperaturbeständigkeit erhältlich. Sämtliche Schäume besitzen in der Regel niedrige thermische Leitfähigkeiten sowie ein gutes akustisches Dämpfungsverhalten. Deutliche Unterschiede können in der Porengröße und Porenstruktur bestehen. Das Material kann entweder offene, geschlossene oder eine Mischung aus offenen und geschlossenen Poren aufweisen. Die Porenstruktur beeinflusst unter anderem Eigenschaften, wie Feuchtigkeits- oder Harzaufnahme und damit die Anbindung an die Decklagen. Ähnlich vielseitig wie die Auswahl unterschiedlicher Schäume sind auch die Einsatzbereiche dieses Kernwerkstoffs. Schäume niedriger Dichte werden vorzugsweise für Isolierungs- und Verpackungszwecke eingesetzt.

Schaumstoffe, die bei Druckbeanspruchung einen relativ hohen Verformungswiderstand aufweisen (Druckspannung bei 10% Stauchung ≥ 80 Pa), werden auch als Hartschaumstoffe bezeichnet [39] und kommen vor allem bei strukturellen Anwendungen, die eine hohe Belastbarkeit fordern, zum Einsatz. Als mögliche Einsatzgebiete sind Rotorblätter für Hubschrauber, Radome sowie Rumpf- und Flügelteile für Sportflugzeuge zu nennen [40]. Weitere Anwendungsbereiche von Hartschäumen als Kernmaterial finden sich in der Möbelindustrie, im Transportsektor und im Schiffsbau. Darüber hinaus eignen sich Schäume besonders für Anwendungen mit hohen Anforderungen an thermische Isolierung oder Schalldämmung, wie beispielsweise Dämmplatten.

Im Gegensatz zu den gängigen Wabenmaterialien bieten Schaumkerne eine flächige und homogene Unterstützung der Decklagen, wodurch sich die Struktur des Kernmaterials nicht auf der Oberfläche des Sandwichbauteils abzeichnet. Eine vergleichbare flächige Unterstützung bieten zwar auch Kerne aus Balsaholz, jedoch besitzen Schäume gegenüber Holzkernen in Abhängigkeit vom Schaummaterial deutliche Vorteile hinsichtlich Feuchteaufnahme, chemischer Beständigkeit und Brandfestigkeit. Für den Einsatz in verschiedenen Anwendungsbereichen ist eine Reihe unterschiedlicher Produkte kommerziell erhältlich.

Für die in Kapitel 7 beschriebenen mechanischen Untersuchungen werden die luftfahrtzertifizierten Schäume Airex R82.60, Divinycell F50, Rohacell®51 RIST, Rohacell®71 Rist [40–42] als etablierte Kernmaterialien zum Vergleich herangezogen.

Kern mit Hohlformelementen

Kernwerkstoffe mit Hohlformelementen beschreiben allgemein Kernmaterialien mit nicht näher definierten hohlen Ausformungen aus einer ebenen Grundfläche. Die verschiedenen Geometrien reichen von Hohlformelementen in zylindrischer Form über Kegelstümpfe bis hin zu Pyramiden. Sie bieten eine flächig begrenzte Anbindung an die Decklagen. Im Unterschied zu Honeycombs, bei denen die Anbindung an die Decklagen ebenfalls nicht vollflächig sondern gitterförmig ist, sind die in Kontakt mit der Decklage stehenden Bereiche bei Kernen mit Hohlformelementen auf mindestens einer Seite nicht miteinander verbunden (s. Abbildung 4.27).

Eine spezielle Variante dieses Kernmaterials stellt die Noppenwabe mit ihren Kegelstümpfen dar. Während die Anbindungsflächen bei Honeycombs auf beiden Seiten identisch sind, unterscheiden sich die Anbindungsflächen bei dem in Abbildung 4.27 dargestellten Kernmaterial. Die Abbildung stellt die kreisförmigen Anbindungsflächen auf der Oberseite der Kernstruktur sowie die Kontaktfläche mit kreisförmigen Aussparungen durch die Noppen auf der Unterseite rot eingefärbt dar.

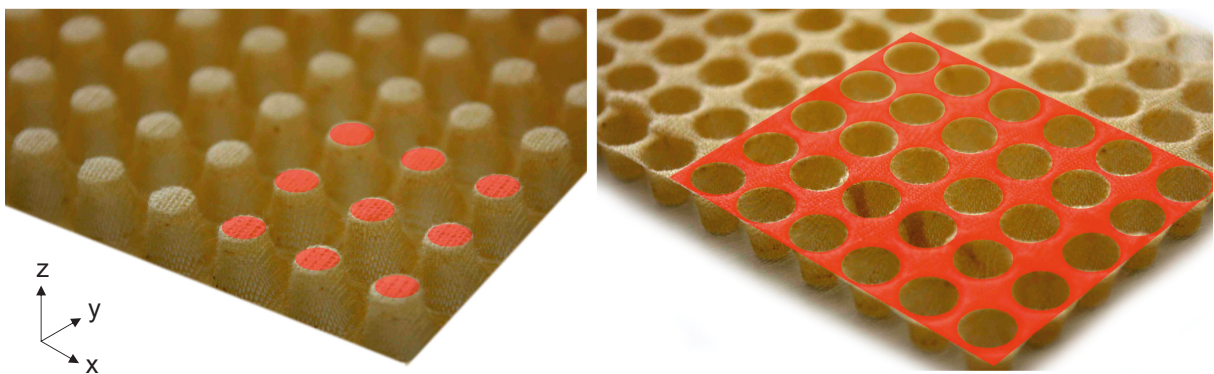


Abb. 4.27: Kontaktflächen eines Kerns mit Hohlformelementen zu den Decklagen auf Ober- (links) und Unterseite (rechts)

Auch existieren Lösungen, bei denen die Hohlformelemente übereinander platziert oder ineinander gesteckt werden [2], um die Sandwichdicke bzw. die Festigkeit zu erhöhen. Ineinander gesteckte Noppenwaben sind in Abbildung 4.28 zu sehen.

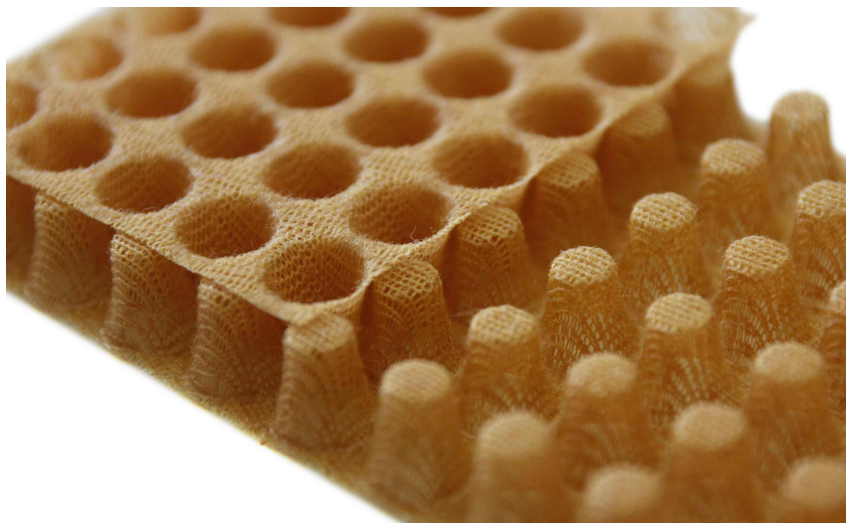


Abb. 4.28: Ineinander gesteckte Noppenwaben

Kerne mit Hohlformelementen lassen sich in verschiedenen Dichten und Geometrien herstellen. Auch die verwendeten Materialien unterscheiden sich teilweise deutlich. Weit verbreitet sind Strukturen aus thermoplastischem Material, die unter anderem im Bauwesen als Drainagefolien eingesetzt werden. Möglich sind auch mit Harz imprägnierte Textilien, die nach der Formgebung ausgehärtet werden [3].

Je nach Anwendung kann die Tatsache von Vorteil sein, dass die 3D-Struktur in x- und y-Richtung offen ist (s. Abbildung 4.27). Die offene Struktur bietet die Möglichkeit der problemlosen Integration von Kabeln und Leitungen in das Sandwichbauteil, wodurch sowohl Platz als auch Kosten eingespart werden können. Auch lässt sich das Bauteil zu Trocknungs- oder Klimatisierungszwecken mit gasförmigen Medien durchströmen und so verschiedene Funktionen ohne vorherige Bearbeitung des Kernmaterials in das Sandwichbauteil integrieren [43]. Exemplarisch sind in Abbildung 4.29 im Kernmaterial verlegte Kabel dargestellt.

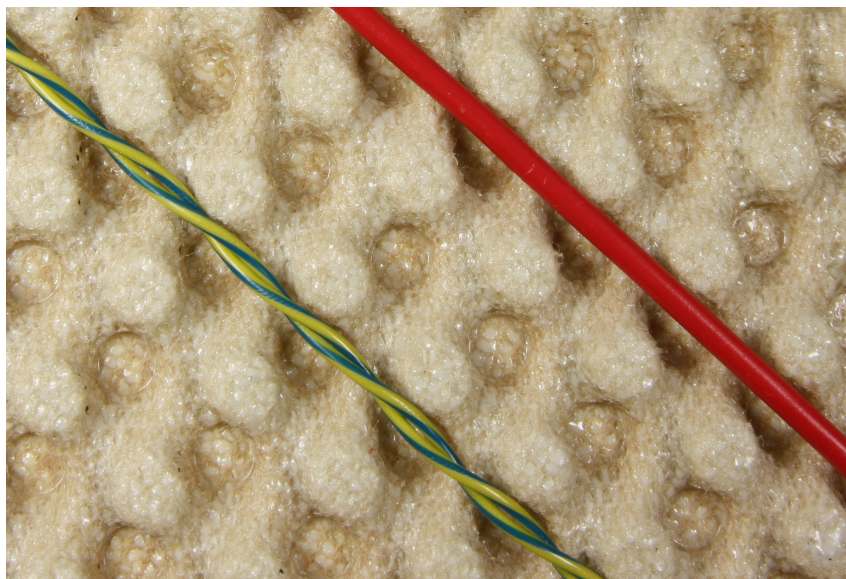


Abb. 4.29: Die gezeigte Struktur bietet die Möglichkeit, Kabel oder andere Leitungen im Sandwich zu verlegen

In Abhängigkeit von der Geometrie der Hohlformelemente ermöglicht das Kernmaterial eine gute Drapierbarkeit über zylindrische, konische und sphärische Oberflächen.

4.1.3 Versagensfälle bei Sandwichstrukturen

Die verschiedenen, im vorigen Abschnitt vorgestellten Kernmaterialien haben entscheidenden Einfluss auf das Verhalten der Sandwichstruktur unter Last. Abhängig von der Art der Belastung und dem Aufbau des Verbundes können Sandwichstrukturen auf verschiedene Weisen versagen. Die Versagensfälle legen die Grenzen des Sandwichverbundes hinsichtlich bestimmter Belastungen fest. Abbildung 4.30 zeigt die wichtigsten Belastungsfälle in schematischer Darstellung.

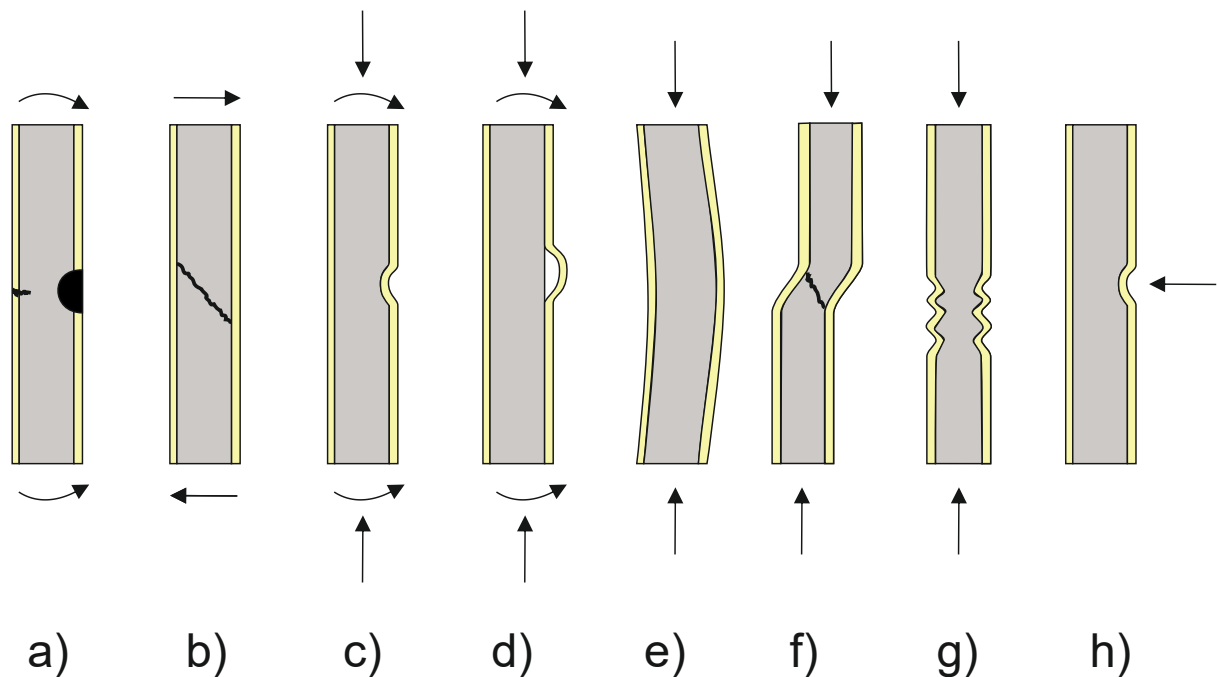


Abb. 4.30: a) Festigkeitsversagen einer Deckschicht oder beider Deckschichten b) Schubversagen im Kern c) Eindellen der Decklage aufgrund von Biegung d) Ablösen der Decklage e) globales Ausbeulen f) Schubbeulen g) lokales Beulen h) Eindellen der Decklage aufgrund lokalen Drucks (eigene Darstellung nach [44])

Die in a, c und d dargestellten Versagensfälle können bei einer Biegebelastung der Sandwichstruktur auftreten. Der in a dargestellte Versagensfall setzt dabei einen sehr belastbaren Kernwerkstoff und eine optimale Anbindung an die Decklage voraus, sodass die auf Zug belastete Decklage das schwächste Glied der Kette darstellt und als erstes versagt. Ein Eindellen der Decklage aufgrund von Biegung (s. Abb. 4.30c) tritt bei der gestauchten Decklage auf, wenn diese an der Versagensstelle nicht durch den Sandwichkern unterstützt wird oder dieser zu schwach ist. Ein solches Versagen tritt vorzugsweise bei strukturierten Kernwerkstoffen, wie beispielsweise Wellkernen, Fachwerkernen oder Noppenwaben auf, welche die Decklagen nicht flächig unterstützen. Ist die Anbindung des Kernmaterials an die Decklagen nur unzureichend, löst sich die gestauchte Decklage vom Kernmaterial ab und knickt ebenfalls (s. Abb. 4.30d).

Der in Abbildung 4.30b zu sehende Versagensfall kann bei angreifenden Querkraften und einer Schubbeanspruchung des Kerns auftreten.

Lokale Druckbelastung oder Impact kann zum Eindellen der Decklage aufgrund lokalen Drucks führen (s. Abb. 4.30h). Der Kern wird gestauch und die Decklage eingedrückt. Bei stärkerer Belastung kann die Decklage auch komplett durchstoßen werden, wie in Kapitel 7.2.5 beschrieben wird.

Wird die Sandwichstruktur in der Materialebene auf Druck belastet, können die in Abb. 4.30e f und g dargestellten Versagensfälle auftreten. Dieser Belastungsfall kommt jedoch in der Praxis nur selten vor, wenn auch beispielsweise druckbeanspruchte Stützen im Flugzeugbau oder Platten im Gehäusebau eingesetzt werden. Eine detaillierte Betrachtung der gezeigten Lastfälle findet sich im „Handbook of Sandwich Construction“ [44].

4.2 Textile Noppenwaben als Kernmaterial

Textile Noppenwaben, welche durch Formgebung und Aushärtung mit Harz imprägnierter textiler Maschenwaren erzeugt werden, sind bereits seit längerem Gegenstand gemeinsamer Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der InnoMat GmbH und der Fraunhofer-Einrichtung für Polymermaterialien und Composite PYCO [2–6]. Durch Variation von Fasermaterial, Struktur und Flächengewicht des Textils, der Harzmatrix sowie durch die Ausgestaltung von Noppenform, -durchmesser und -höhe, kann die Noppenwabe an eine Vielzahl von Anwendungsfällen gezielt angepasst werden.

Im Gegensatz zu genoppten Kunststofffolien wie sie beispielsweise als Drainagefolien zum Einsatz kommen, werden textile Noppenwaben nicht in großer Stückzahl hergestellt. Der Einsatz textiler Noppenwaben als Kernmaterial ist daher zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch sehr begrenzt. Für die Zukunft eröffnen die in Abschnitt 4.1.2 beschriebenen Vorteile der Noppenwabe ein breites Spektrum technischer Einsatzbereiche, sofern es gelingt, dieses Kernmaterial kontinuierlich und effizient herzustellen.

Der derzeitige Stand der Technik textiler Noppenwaben lässt sich aus verschiedenen Patenten und Veröffentlichungen ableiten. Das im Jahr 1973 veröffentlichte Patent P2258513 beschreibt ein „Genopptes Flachmaterial sowie Verfahren und Vorrichtung für seine Herstellung“ [45]. Das in diesem Dokument dargestellte Verfahren bezieht sich in erster Linie auf thermoplastische Materialien, die im warmen Zustand oberhalb ihrer Erweichungstemperatur umgeformt werden und dann im erkalteten Zustand diese Form halten (s. Abbildung 4.31). Es lässt sich prinzipiell in leicht abgewandelter Form auf weitere Materialien, wie z.B. Glas oder auch imprägniertes Textil anwenden [45].

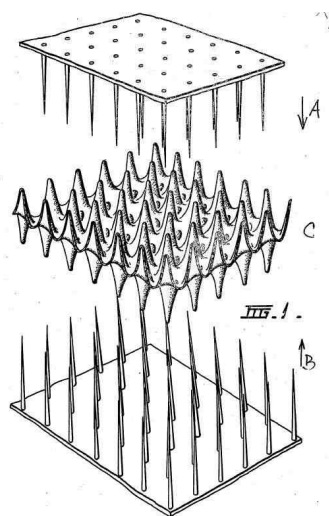


Abb. 4.31: Werkzeuge und genopptes Material (Quelle: Patent DE2258513A1 [45])

Die textile Noppenwabe, wie sie im Wesentlichen auch Gegenstand der vorliegenden Dissertation ist, wird erstmals in dem Patent DE3412846A1 der Firma Hoechst aus dem Jahr 1985 beschrieben (später Patent EP0158234B1). Es handelt sich dabei um einen flächenförmigen „Sandwichformkörper, der aus zwei äußeren festen Deckschichten und wenigstens einem, durch Tiefziehen verformten und mit Kunstharz versehenem Fasermaterial als Kern besteht. Das den Kern bildende Flächengebilde aus Fasermaterial kann z.B. eine Maschenware sein, die mit einem aushärtbaren Kondensationsharz versehen ist.“ [46] In dieser Offenlegungsschrift werden jedoch keine exakten Angaben zur Herstellung des Kernmaterials gemacht. Dies geschieht unter anderem in weiteren Patenten der Firma Hoechst, welche in den darauffolgenden Jahren veröffentlicht wurden [47–51].

Das Patent EP0385432B1 aus dem Jahr 1994 hat ein „Verfahren zur Herstellung eines dreidimensional verformten, beharzten Textilmaterials und seine Verwendung“ zum Inhalt. „Beschrieben wird ein

Verfahren zur Herstellung eines formstabilen, dreidimensional verformten, beharzten, flächenförmigen Textilmaterials, bei dem man eine oder mehrere Schichten eines tiefziehfähigen Textilmaterials und eine oder mehrere Harzfolien übereinander stapelt und den Stapel bei einer Temperatur, bei der das Harz fließfähig wird, durch Tiefziehen in die gewünschte Form bringt, die Temperatur so einstellt, daß das Harz erhitzen kann, und den geformten Stapel so lange in dieser Form hält, bis das Harz vollständig oder hinreichend erhärtet ist.“ [52]

In einem weiteren Patent (DE9721370A1, Offenlegung 1998) [50] wird ein „Verfahren zur Herstellung eines dreidimensional verformten Netzwerkstoffes, Netzwerkstoff, sowie Verwendung dieses Netzwerkstoffes“ beschrieben. Es handelt sich dabei um ein Verfahren zur kontinuierlichen Herstellung eines dreidimensional verformten offenmaschigen Netzwerkstoffes. Das Textil enthält dabei sowohl Verstärkungsfasern als auch Matrixfasern, die bei niedrigerer Temperatur als die Verstärkungsfasern schmelzen. Nach einer Erwärmung des Textils, bei der die Matrixfasern zumindest an der Oberfläche schmelzen, wird das Textil durch Strukturierungselemente in Form gebracht und während der Formgebung abgekühlt, sodass die wieder erstarrten Matrixfasern das Textil in umgeformten Zustand fixieren [50].

Ein von der Firma TEXTEC Textil Engineering und Consulting GmbH angemeldetes Patent (EP 0324714B1, Offenlegung 1996) [53] widmet sich ebenfalls einem textilen Flächenmaterial, welches unter Wärmeeinfluss verformt wird. „Dieses Flächenmaterial wird derart unter Wärmeformver Streckung mechanisch verformt, daß dabei die Filamentgarne weiter verstreckt bzw. orientiert werden, wobei die dem Flächenmaterial erteilte Strukturierung fixiert wird.“ [53] Eine Harzmatrix zur Fixierung der Struktur ist nicht notwendig.

Nachteilig bei allen genannten Patenten ist die Einschränkung auf thermoplastische Materialien, die unter Temperatureinfluss erweichen und dadurch die Herstellbarkeit temperaturbeständiger und flammfester Kernmaterialien deutlich limitieren. Die Schweizer Firma Irbit Research + Consulting AG beschreibt daher in Ihrem Patent (EP0480140A2, Offenlegung 1992) [54] einen anderen Weg der Strukturfixierung. Eine mit Harz imprägnierte, elastische Maschenware wird zwischen zwei Werkzeugen (s. Abbildung 4.32) in Form gebracht, mindestens bis zur Formstabilität ausgehärtet und anschließend entformt.

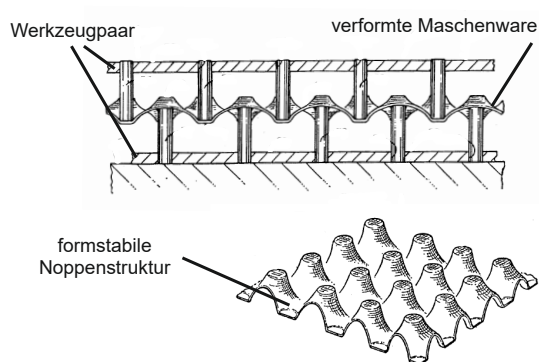


Abb. 4.32: Werkzeugpaar und damit hergestellte Noppenstruktur (eigene Darstellung nach [54])

Die genoppte Struktur kann dabei vollständig zwischen den Werkzeugen oder nach dem Entformen außerhalb der Werkzeuge ausgehärtet werden. Durch Anpassung der strukturgebenden Werkzeugelemente lässt sich eine Vielzahl von Noppengeometrien, ggf. auch mit unterschiedlichen Noppenhöhen in definierten Bereichen, herstellen. Ebenfalls wird die weitere Option, durch das Aufbringen von Decklagen auf das strukturierte Material Sandwichpanels herzustellen, in dem Patent beschrieben [54].

In vergleichbarer Art und Weise wie in [54] beschrieben, jedoch mit unterschiedlichen Werkzeugen (siehe Abbildung 4.33) wurden auch bei der Fraunhofer PYCO in Zusammenarbeit mit der InnoMat GmbH Untersuchungen im Bereich genoppter Kernwerkstoffe durchgeführt und deren Ergebnisse teilweise veröffentlicht [2–6]. Neben Optimierungen der Noppenwabengeometrie lag der Fokus der durchgeführten Arbeiten vor allem darauf, durch eine Beschleunigung der Härtingsreaktion des eingesetzten Matrixharzes die Fertigungskapazität zu erhöhen. Einen umfangreichen Überblick hierzu gibt der WKP-Abschlussbericht (Wachstums-kern-Potential) „Harzentwicklung und Weiterentwicklung der Noppenwabe - Schnelle Prepreg-Systeme (Förderkennzeichen 03WKP06A)“ [3].

Die für die vorliegende Arbeit besonders relevanten Patente zu textilen Noppenwaben, hergestellt durch Formgebung harz imprägnierter Maschenwaren, sind die im aktuellen Kapitel beschriebenen Patente EP 0158234B1 „Flächenförmiger Sandwichformkörper“ (Offenlegung 1990) sowie EP048014A2 „Method and apparatus for manufacturing dimpled structures from elastic cloth“ (Offenlegung 1992). Das Patent EP0158234B1 ist mittlerweile ausgelaufen, während für die Offenlegungsschrift EP048014A2 kein Patent erteilt wurde. Aus diesem Grund ist die Noppenwabe als Kernmaterial nicht mehr patentrechtlich geschützt.

4.2.1 Herstellung textiler Noppenwaben

Die bisher bei der Fraunhofer PYCO in Kooperation mit der InnoMat GmbH erzeugten Noppenwaben wurden mit einem diskontinuierlichen Fertigungsverfahren hergestellt, bei dem ein mit Harz imprägniertes Textil zwischen zwei Werkzeugplatten bei erhöhtem Druck und Temperatur in Form gebracht und ausgehärtet wird. Dieses Verfahren beinhaltet zahlreiche manuelle Arbeitsschritte, ist zeitaufwändig und erlaubt mit den vorhandenen Kapazitäten nur die Herstellung geringer Mengen.

Die verwendeten Werkzeugpaare zur Formgebung der Noppenwaben setzen sich aus einer Positiv- und einer Negativform zusammen (s. Abbildung 4.33). Die Positivform besteht aus einer Platte mit eingesetzten Zylinderstiften, wohingegen es sich bei der Negativform um eine Platte mit deckungsgleich positionierten Bohrungen handelt, in welche die Zylinderstifte bei der Formgebung versenkt werden.

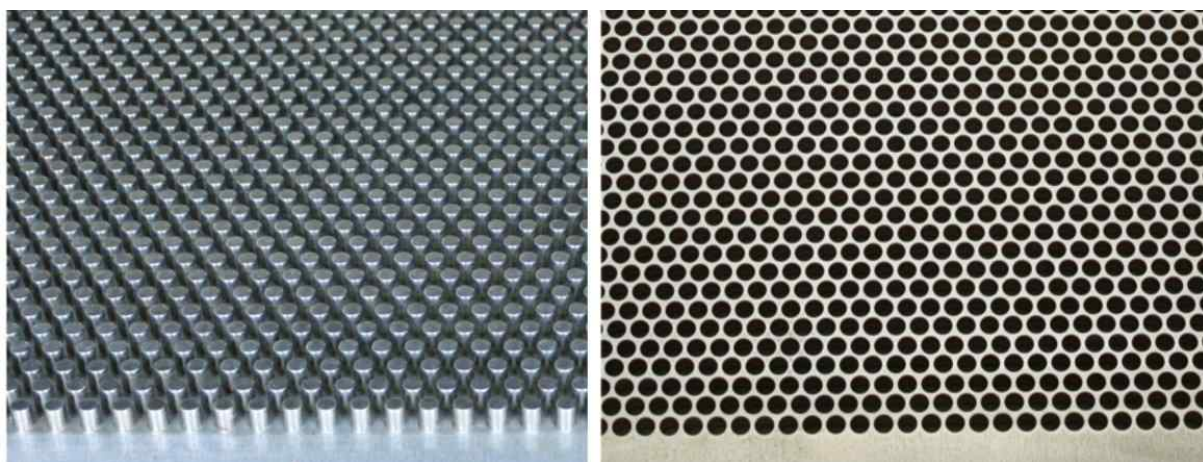


Abb. 4.33: Positiv- und Negativwerkzeug zur Herstellung der Noppenwabe (dreieckige Anordnung)

Das etablierte diskontinuierliche Fertigungsverfahren wird im Folgenden kurz beschrieben: Vor dem Fertigungsprozess ist es erforderlich ein Trennmittel auf die Oberflächen des Werkzeugpaares aufzubringen, damit die Herstellung von Noppenwaben in reproduzierbarer Qualität gelingt. Nur

durch eine effektiv trennende Oberfläche kann eine Beschädigung des Kernmaterials beim Entformen vermieden werden. Das verwendete Trennmittel hängt dabei vom eingesetzten Harzsystem ab.

In einem ersten Arbeitsschritt wird das Textil mit Harz imprägniert, bevor es anschließend über das mit Trennmittel vorbehandelte Positivwerkzeug gelegt und in Form gebracht wird. Bei der Verformung des Textils in die dreidimensionale Struktur der Noppenwabe, wird dessen Fläche abhängig von der Geometrie deutlich vergrößert. Je nach Noppendurchmesser und Abstand der Noppen zueinander ist die maximale Noppenhöhe durch die Dehnbarkeit des Textils limitiert. Übersteigt die gewünschte Noppenhöhe das Formänderungsvermögen des Textils, muss es vor der Formgebung zur Noppenwabe im Werkzeug vorgerafft werden, damit es die Verformung ohne Versagen tolerieren kann (s. Abschnitt 5.2.2). Durch diesen Schritt wird mehr Material vorgehalten und so eine Verformung bis zur gewünschten Noppenhöhe ohne Einreißen des Textils ermöglicht.

Die Formgebung findet durch das Absenken der oben liegenden Negativform statt, indem diese das Textil in den Bereichen zwischen den Zylinderstiften nach unten drückt. Der Weg, den die Stifte in das Negativwerkzeug eintauchen, gibt dabei die Noppenhöhe vor.

Das beim Imprägnieren aufgebraachte Harz wird nach dem Schließen des Werkzeugpaares im Werkzeug ausgehärtet und so das Textil dauerhaft im Zustand der ausgeformten Noppenwabe fixiert. Je nach Harzsystem und Temperatur dauert dieser Schritt zwischen einigen Minuten und einigen Stunden. Beim Entformen der ausgehärteten Noppenwabe wird das Oberteil des Werkzeugs entfernt und die formstabile Compositstruktur entnommen (siehe Abbildung 4.34). Sämtliche Varianten der bisher in Kooperation von der Fraunhofer PYCO und InnoMat GmbH gefertigten Noppenwaben haben eine ähnliche Noppengeometrie mit runden Ausformungen gemein.

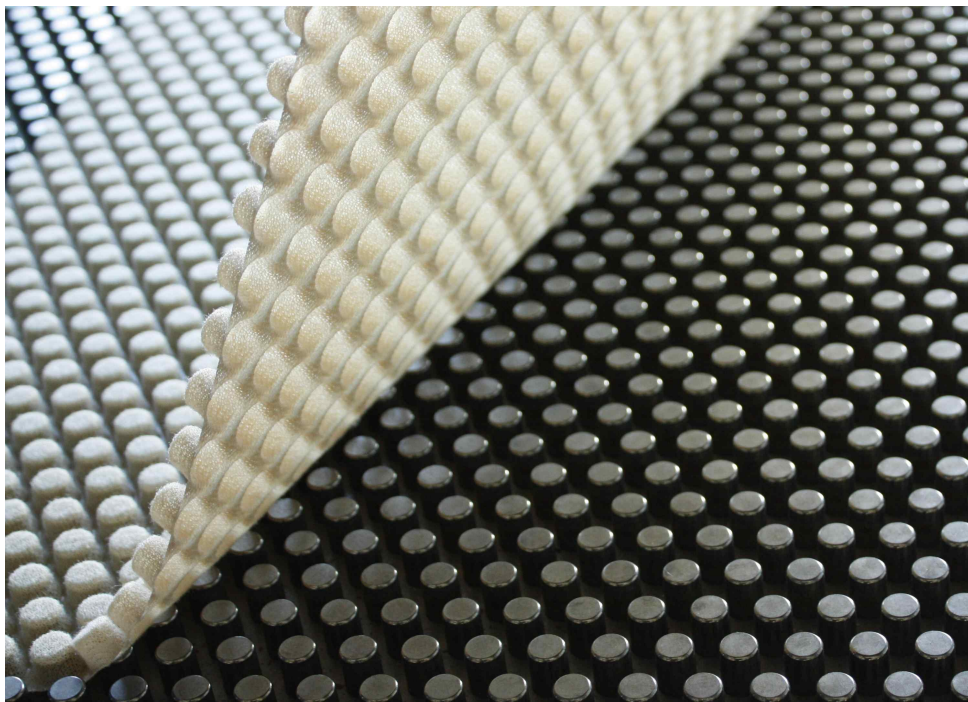


Abb. 4.34: Entformen einer ausgehärteten Noppenwabe (Quelle: InnoMat GmbH)

Kontinuierliche Verfahren zur Herstellung von Noppenwaben

Kontinuierliche Verfahren zur Herstellung genoppter Strukturen sind zwar in der Praxis im Einsatz, beschränken sich jedoch auf thermoplastische Kunststofffolien. Hier ist das Patent DE10012418A1 (Offenlegung 2001) zu nennen, welches eine „Noppenwalze für die Herstellung von Noppenbahnen“ beschreibt [55]. Dort werden für die „Herstellung von Noppenbahnen Walzen verwendet, die im Bereich der Noppenbildung an der Walzenmantelaußenseite mit Unterdruck beaufschlagt werden und im Bereich der Ablösung der entstandenen Noppenbahn an der Walzeninnenseite mit Druck beaufschlagt werden.“ [55] Dieses Fertigungsverfahren ist jedoch für imprägnierte Textilien nur bedingt geeignet, da aufgrund der Luftdurchlässigkeit des Textils eine Formgebung mittels Unterdruck deutlich schwerer zu realisieren ist als bei einem geschlossenen Material. Weiterhin besteht die Gefahr, dass durch den Unterdruck Harz aus dem Textil gesaugt wird.

Entsprechend dem im vorigen Abschnitt beschriebenen etablierten Fertigungsverfahren kann die Strukturierung am einfachsten durch den Einsatz formgebender Werkzeuge erzeugt werden. Im bereits zu Beginn des Kapitels 4.2 erwähnten Patent DE2258513A1 wird eine kontinuierliche Fertigung mittels zweier Nadelbänder beschrieben (s. Abbildung 4.35).

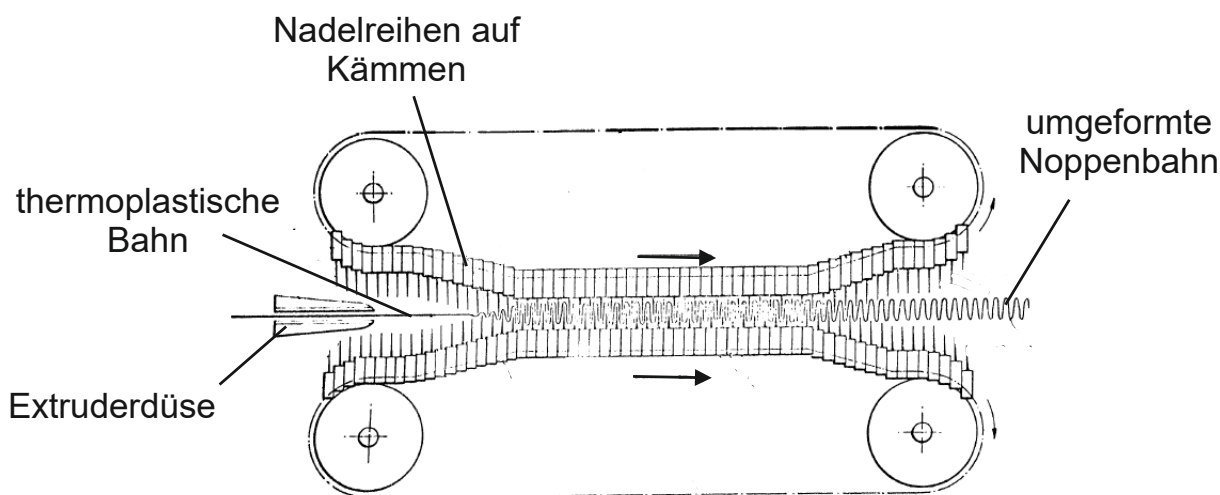


Abb. 4.35: Kontinuierliches Verfahren zur Strukturierung thermoplastischer Folien (eigene Darstellung nach [45])

Diese Art der Formgebung lässt sich auch auf imprägnierte Textilien ohne thermoplastischen Anteil übertragen. In diesem Fall muss die Fixierung der Struktur jedoch durch die Aushärtung des Matrixharzes geschehen. Diese Form der Härtung ist in Patent DE3139222A1 (Offenlegung 1983) beschrieben, welches eine „Wetterfeste Tischtennisplatte sowie Verfahren und Vorrichtung zu ihrer Herstellung“ zum Inhalt hat. Wie auch im Patent DE2258513A1 wird das Kernmaterial zwischen zwei Werkzeugbändern in einem kontinuierlichen Prozess geformt. Anders als bei der textilen Noppenwabe handelt es sich hierbei jedoch nicht um eine mit Harz imprägnierte Maschenware, sondern um eine harzgetränkte Fasermatte, welche zwischen zwei elastische Folien eingebracht und im Verbund mit den Folien umgeformt wird (s. Abbildung 4.36).

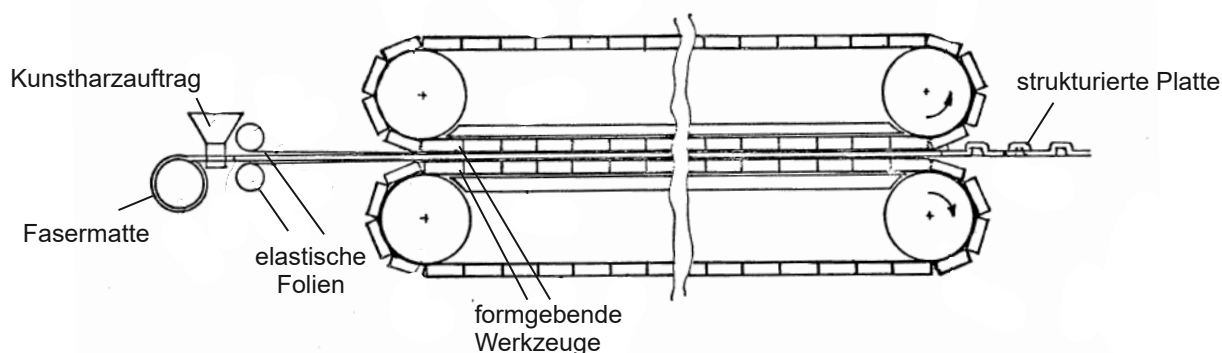


Abb. 4.36: Kontinuierliches Verfahren zur Herstellung einer wetterfesten Tischtennisplatte (eigene Darstellung nach [56])

Für beide genannten Patente (DE2258513A1, DE3139222A1) existieren keine Schutzrechte. Ein kontinuierliches Verfahren zur Herstellung brandfester textiler Noppenwaben mit einem duromeren Harzsystem konnte nicht ermittelt werden. Ebenso fielen bei der Marktrecherche keine kommerziell erhältlichen Produkte auf, die von den Vorzügen einer leichten, belastbaren, brandfesten, textilen Noppenwabe Gebrauch machen.

Kommerziell verfügbare Noppenwaben

Neben den bei der Fraunhofer PYCO und der InnoMat GmbH hergestellten Noppenwaben bietet die Mayser GmbH & Co. KG ein dreidimensional geformtes technisches Textil an, welches eine mit der Noppenwabe vergleichbare Geometrie besitzt. Hierbei handelt es sich um die einzige ermittelte derzeit kommerziell erhältliche Noppenwabe, jedoch kommt das Material in erster Linie als Designelement zum Einsatz, da es keine ausreichende Stabilität für die Verwendung als Kernmaterial besitzt.

Im Datenblatt des Produkts wird angegeben, dass sich bei Platten- oder Rollenware fertigungsbedingte Rapportabsätze im Abstand von 560 mm befinden. Der bei diesem Produkt übliche Noppenabstand mit einem Raster von 28 mm kann im Bereich dieser Rapportabsätze nicht gewährleistet werden [57], was auf eine semikontinuierliche Fertigung schließen lässt, bei der jeweils Abschnitte von 560 mm nacheinander hergestellt werden. Das von Mayser verwendete Textil besteht laut Datenblatt aus 92% Polyester, 3% Lycra® und 5% Polyamid. Kombiniert wird das Textil mit einem Harz aus melaminvernetztem Polyvinylacetat [57], was laut Datenblatt eine Temperaturbeständigkeit bis 150 °C ermöglicht.

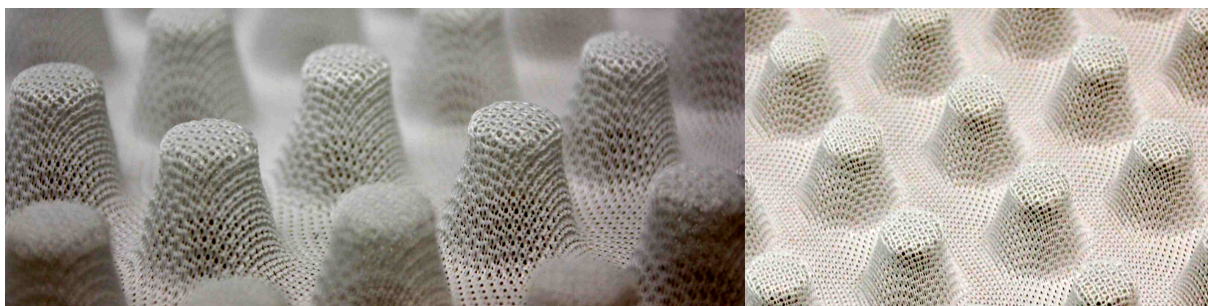


Abb. 4.37: Kommerziell erhältliches technisches 3-D Textil aus dem Hause Mayser GmbH & Co. KG

Aufgrund seiner Brennbarkeit ist Polyester für viele Anwendungsbereiche ungeeignet, sodass der Ein-

satzbereich für das technische Textil von Mayser (Brandklasse B3) diesbezüglich limitiert ist. Eine sinnvolle Alternative für schwer entflammable Kernmaterialien stellen Glas- oder Aramidfasern dar. Diese Materialien verfügen jedoch über eine deutlich niedrigere Streckgrenze als Polyester, was die Fertigung des strukturierten Kernmaterials erschwert.

4.2.2 Geeignete Textilien zur Herstellung von Noppenwaben

Bei sämtlichen Noppenwaben wird bei der Formänderung vom ebenen Material in die dreidimensionale Struktur der Noppenwabe die Fläche des Textils je nach Geometrie deutlich vergrößert. Eine solche Änderung der Oberfläche kann bei geeignetem Fasermaterial durch eine Dehnung der einzelnen Filamente erreicht werden. Zahlreiche Fasern, darunter Aramidfasern, welche ein nahezu optimales Eigenschaftsprofil für die Herstellung brandfester Noppenwaben bieten, sind jedoch kaum dehnbar (Bruchdehnung: ca. 1,9 - 4,4%) [58]. Im Gegensatz zu Polyesterfasern ist es nicht möglich, die Fasern signifikant zu dehnen und auf diese Weise die Ausdehnung des Textils zu realisieren. Ein Überschreiten der Dehngrenze führt zum Reißen des Textils, sodass ein anderer Weg gefunden werden muss, um die Fläche des Textils zu vergrößern. Möglich ist in diesem Fall der Einsatz von Maschenwaren bei denen die Maschen verformt werden können, ohne dass die einzelnen Filamente ihre Länge signifikant ändern.

DIN 60 000 definiert Maschenwaren als „Flächengebilde, die aus einem oder mehreren Fäden oder aus einem oder mehreren Fadensystemen durch Maschenbildung hergestellt sind“ [59]. Durch eine Formänderung dieser Maschen kann also beispielsweise auch ein aus Aramidfasern bestehendes Textil gedehnt werden.

Maschenwaren lassen sich abhängig von der Art der Nadelführung zu deren Herstellung unter anderem in Gestricke und Gewirke unterteilen. Bei der Textilherstellung nach dem Kettenwirkverfahren werden die Fäden eines Wirkfadensystems oder mehrerer Wirkfadensysteme gleichzeitig und parallel zu Maschen umgeformt, wobei die Fäden längs und parallel zu den Nadeln verlaufen (Längsfadenware). Im Gegensatz dazu wird beim Stricken das Fadenmaterial quer an den Nadeln vorgelegt und durch diese zu Schleifen verformt. Daher werden Gestricke oftmals synonym als Querfadenware (weft knitted fabric) bezeichnet [60]. Wie in Abbildung 4.38 dargestellt, werden die Nadeln bei Strickmaschinen einzeln und bei Wirkmaschinen kollektiv bewegt [61].

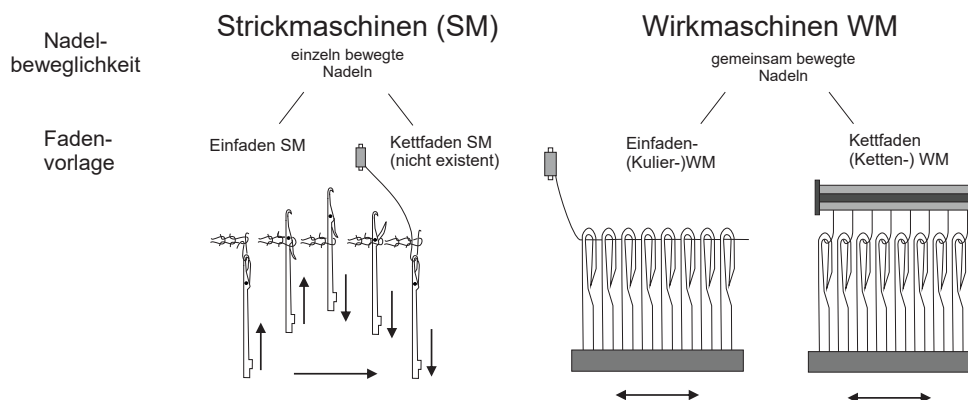


Abb. 4.38: Einteilung der maschenbildenden Maschinen (eigene Darstellung nach [61])

Eine Übersicht verschiedener Textiltypen ist in Abbildung 4.39 zu sehen.

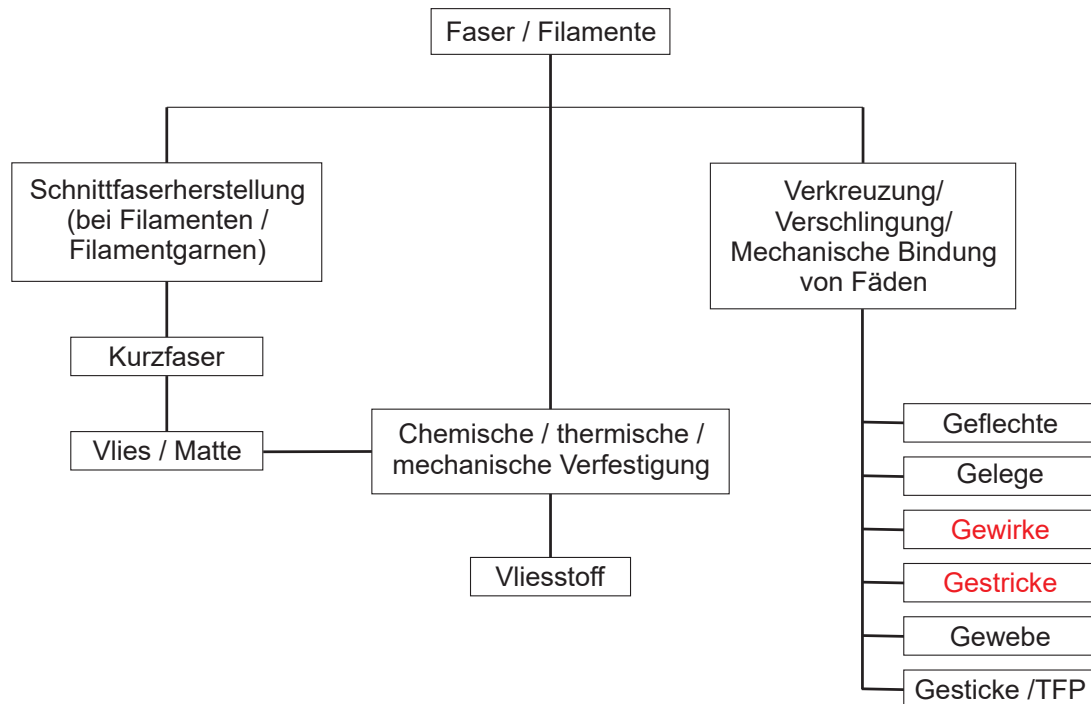


Abb. 4.39: Einteilung textiler Gebilde (eigene Darstellung nach [62])

Gewirkte Textilien

Die Kettenwirktechnik zählt zu den produktivsten textilen Fertigungsverfahren und ermöglicht eine besonders wirtschaftliche Herstellung großer Mengen. Weitere Vorteile liegen in der Einstellbarkeit der Winkel, unter denen die einzelnen Fadenlagen zueinander angeordnet werden können sowie in den vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten beim Lagenaufbau und der Lagenanordnung. Dies eröffnet einen großen Spielraum für die Gestaltung der gewirkten Halbzeuge, der in dieser Form mit keinem anderen Flächenbildungsverfahren erreicht wird [60].

Für die Herstellung der Noppenwabe ist insbesondere die Möglichkeit interessant, unterschiedlichste Fadenmaterialien in multiaxialer Orientierung anzuordnen und eine belastungsgerecht gestreckte Ausrichtung der Fäden zu ermöglichen. Dabei stehen verschiedene Maschenvarianten zur Verfügung, um das Textil an die jeweilige Anwendung anzupassen. Die Art, Form und Anordnung der Maschen wird als Bindung bezeichnet (s. DIN 62050) [63]. Es existieren verschiedene Grundbindungen, welche die Basis für die Bindungskonstruktion der Kettengewirke bilden. Dabei handelt es sich um Maschenbindungen, die mit einem Fadensystem hergestellt werden. Die einfachste aller Bindungsvarianten stellt die „Fransenbindung“ dar, bei der keine Querverbindungen zwischen den einzelnen Maschenstäbchen entstehen. Daher ist bei dieser Bindungsart ohne Hilfsfäden in Querrichtung auch keine Herstellung von Flächengebilden möglich. Bei den Grundbindungen „Trikot“, „Tuch“, „Satin“ und „Samt“ wechselt die Versatzrichtung in jeder Reihe, wobei die Länge der Unterlegungen zwischen einer und vier Nadelgassen variiert. (Trikotbindung - um eins, Tuch - um zwei, Satin - um drei, Samt - um vier) [60]. Die Maschenbilder von Franse, Trikot und Tuch sind in Abbildung 4.40 dargestellt.

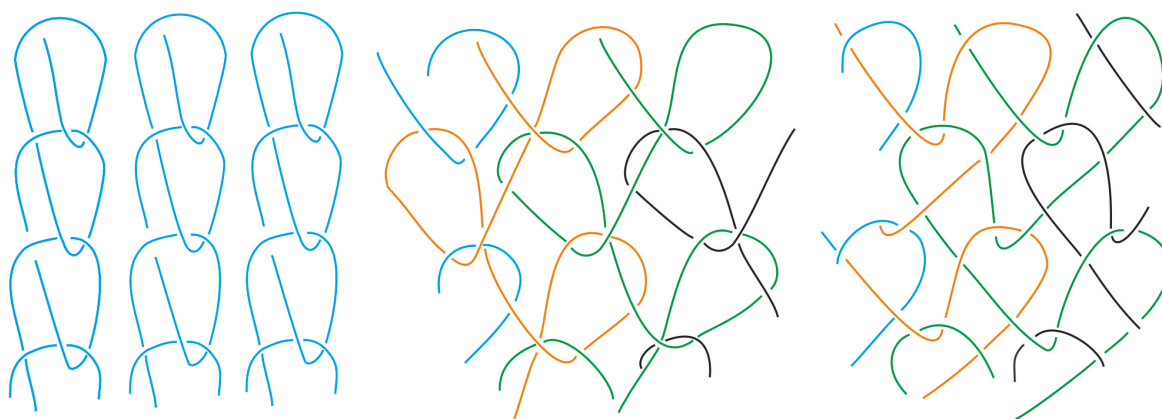


Abb. 4.40: Beispiele für Maschenbilder gewirkter Textilien ((Rechts-Links = RL) RL-Franse, RL-Trikot, RL-Tuch) (eigene Darstellung nach [60])

Gestrickte Textilien

Beim Stricken wird das textile Flächengebilde durch die Verbindung von Fadenschleifen miteinander erzeugt. Hierbei wird derselbe Arbeitstakt an den Nadeln über die Arbeitsbreite zeitlich nacheinander ausgeführt [64].

Ebenso wie beim Wirken ist beim Stricken die Masche das Grundbindungselement. Anders als bei gewirkten Maschen bestehen die Maschen beim Stricken jedoch aus Kopfbogen, bzw. Maschenkopf, zwei Maschenschenkeln sowie zwei Fußbögen bzw. Maschenfüßen. Dargestellt ist eine solche Masche in Abbildung 4.41.

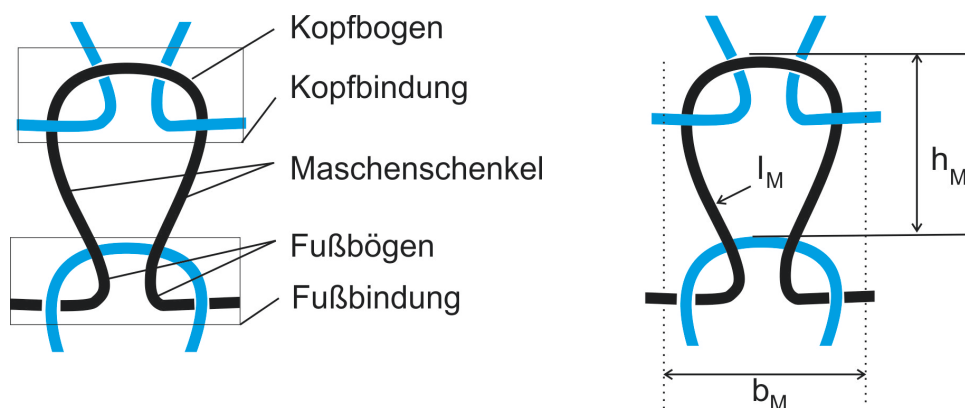


Abb. 4.41: Bestandteile einer Masche und Maschengometrie (eigene Darstellung nach [64])

Es ist zu erkennen, dass eine Masche stets zwei unterschiedliche Seiten aufweist. Blickt man von der Seite auf das Gestrick, zeigt die rechte Maschenseite die Maschenschenkel, die linke Maschenseite die Kopf- und Fußbögen. In Abbildung 4.42 sind sowohl die rechte, als auch die linke Maschenseite eines Rechts-Links-Gestricks dargestellt. Bei der linken Maschenseite liegen Kopf- und Fußbogen oben, während auf der rechten Seite des Gestricks die Maschenschenkel oben liegen. Die entsprechenden Teile der Masche sind jeweils rot eingefärbt.

Die korrekte Bezeichnung für ein wie in Abbildung 4.42 dargestelltes Rechts-Links-(RL)-Gestrick lautet „single jersey“. Bei dieser Art von Gestrick befinden sich auf der rechten Gestrickseite die Maschenschenkel und auf der linken Gestrickseite die Kopf- und Fußbögen, sodass eine hohe Einrollneigung des Flächenmaterials [64] entsteht, da das Fadenmaterial stets einen spannungsarmen Zustand anstrebt. Durch den Wechsel der Abschlagrichtung nach jeder Masche lässt sich ein Rechts-

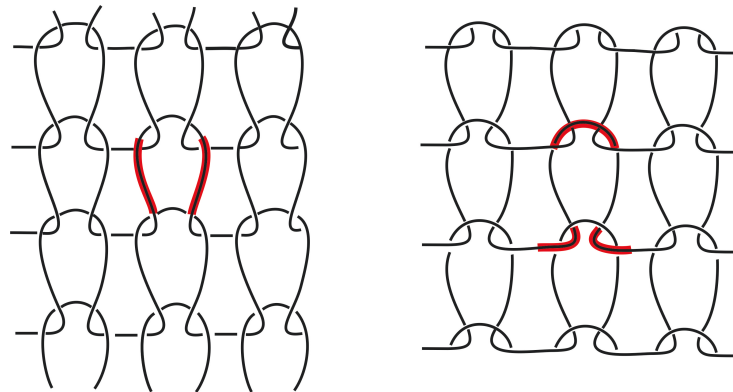


Abb. 4.42: links: Rechte Maschenseite (Maschenschenkel obenliegend) rechts: Linke Maschenseite (Kopf- und Fußbogen obenliegend) eines Rechts-Links-Gestrics (eigene Darstellung nach [64])

Rechts (RR) Gestrick, ein so genanntes „double jersey“ herstellen. Aufgrund der Tatsache dass bei dieser Variante die Maschenausrichtung alterniert, lässt sich die Einrollneigung kompensieren, indem sich die durch die Fadenverformung eingebrachten Kräfte auf beiden Seiten des Gestrics aufheben. Eine Gegenüberstellung beider Grundbindungen findet sich in Abbildung 4.43.

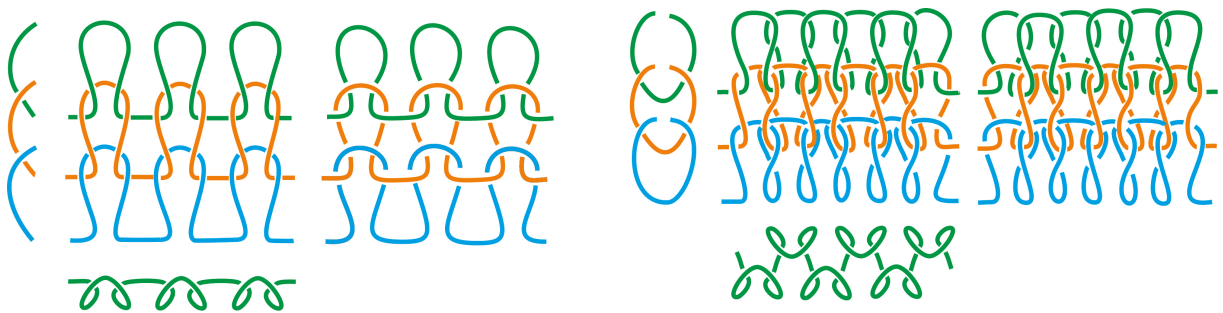


Abb. 4.43: Seitenansicht, Frontansicht und Draufsicht auf single- und double-jersey-Gestrick
links: RL-Gestrick (single jersey) rechts: RR-Gestrick (double jersey) (eigene Darstellung nach [64])

Weitere Bindungsvarianten sind Rechts-Rechts-gekreuzt (RRG) „interlock“, Links-Links (LL) „purl stitch“ und verschiedene Mehrlagengestricke. Ein umfassender Überblick zu sämtlichen Gestricksvarianten und deren Eigenschaften findet sich in Kapitel 7 des Buches „Textile Werkstoffe für den Leichtbau“ von C. Cherif [64].

4.2.3 Verbesserungspotential bestehender Noppenwaben

In der Vergangenheit wurde bei der InnoMat GmbH und der Fraunhofer PYCO mit unterschiedlichen Noppengeometrien gearbeitet, die sich hinsichtlich Anordnung, Noppenhöhe und Noppendurchmesser unterscheiden. Allen Varianten gemeinsam war die Herstellung mit Positiv- und Negativwerkzeug, die eine Struktur mit ebener Grundfläche und daraus herausragenden Noppen erzeugt. Hinsichtlich der Noppenanordnung wurde hauptsächlich mit zwei Varianten gearbeitet. Zum einen handelt es sich um eine quadratische Anordnung der Noppen, zum anderen um eine dreieckige Anordnung, bei der die Noppen in der dichtest möglichen Konfiguration angeordnet sind. Beide Varianten der Noppenanordnung sind exemplarisch in Abbildung 4.44 dargestellt.

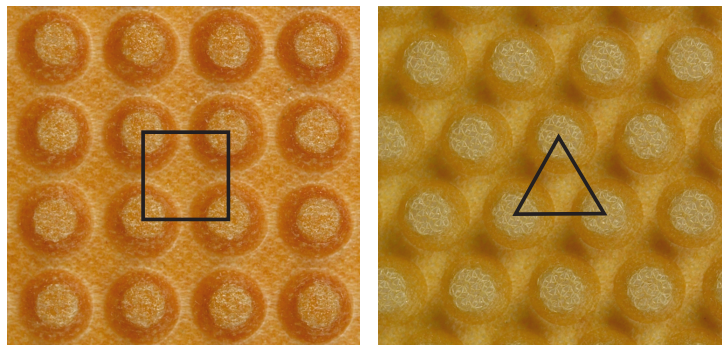


Abb. 4.44: Noppenwabe mit einseitig ausgebildeten Noppen
links: quadratische Anordnung
rechts: dreieckige Anordnung

Sowohl bei dreieckiger als auch bei quadratischer Anordnung der Noppen bringt die Struktur einige Nachteile mit sich, auf die im Folgenden eingegangen werden soll.

Drapierbarkeit

Durch die ebene Grundfläche der Struktur ist die Drapierbarkeit über Freiformflächen eingeschränkt. Das Material lässt sich problemlos zylindrisch oder konisch drapieren, auf komplexere Oberflächen mit Krümmungen in mehreren Richtungen kann das Material jedoch nicht ohne ein- oder zugeschnittene Elemente aufgebracht werden (s. Abbildung 4.45).

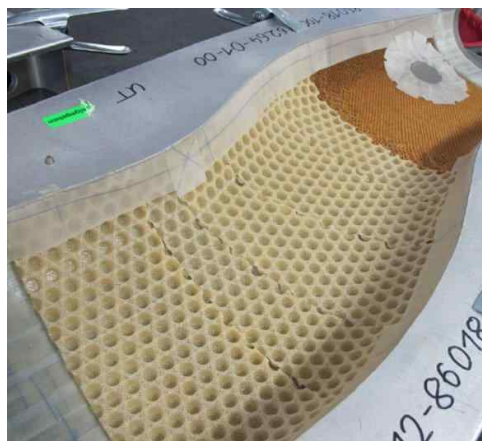


Abb. 4.45: Drapierte Noppenwabenzuschnitte zur Realisierung mehrfach gekrümmter Flächen (dreieckige Noppenanordnung) (Quelle: Diehl Aircabin)

Linienbildung

Es besteht die Tendenz zur Linienbildung zwischen den Noppen, die regelmäßig angeordnet und miteinander nur durch die Bodenfläche verbunden sind (s. Abbildung 4.46). In den Bereichen zwischen den Noppendeckflächen werden die Decklagen nicht gestützt und können dort knicken. Bei ungünstiger Beanspruchung des Sandwichpanels, beispielsweise im 4-Punkt-Biegeversuch mit nach oben gerichteten Noppen, knicken die Decklagen in den ungestützten Bereichen ein und führen zum Versagen des Panels. Eine detaillierte Betrachtung hierzu erfolgt in Kapitel 7.2.4.

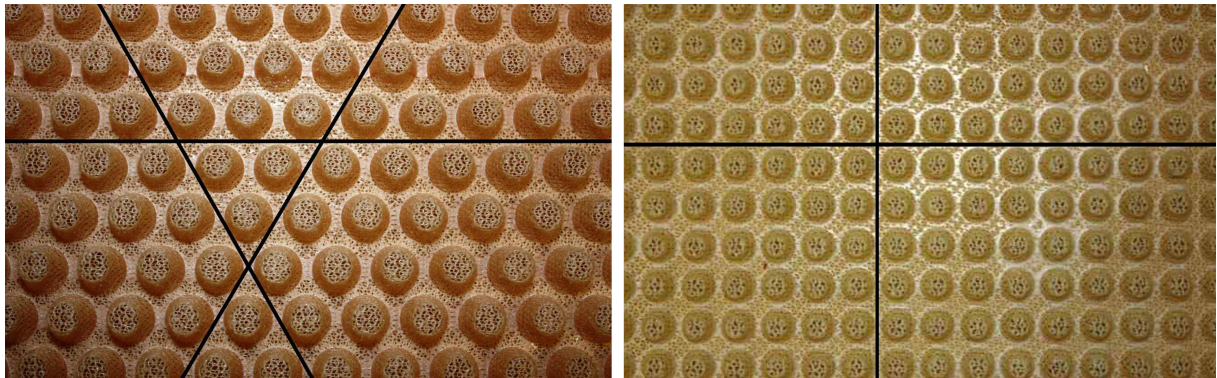


Abb. 4.46: Linienbildung bei regelmäßiger Noppenanordnung (links: Dreieckig rechts: Quadratisch)

Telegraphing

Jedes Kernmaterial hat Einfluss auf die Oberfläche des damit hergestellten Sandwichbauteils. Durch ein Eindrücken der Decklagen in den nicht gestützten Bereichen kommt es bei der Noppenwabenstruktur beim Einsatz leichter Decklagen zu ausgeprägtem „Telegraphing“, einem Effekt, bei dem sich die tragende Struktur durch die Decklage abzeichnet. Dargestellt ist dies in Abbildung 4.47, welche die Panelober- und Unterseite eines Sandwiches mit Noppenwabenkern zeigt. Neben den Decklagen hat auch der Verarbeitungsprozess entscheidenden Einfluss auf das Telegraphing.



Abb. 4.47: Telegraphing auf der Ober- und Unterseite eines Panels mit Noppenwabe als Kernmaterial

Der Telegraphing-Effekt tritt auch bei Honeycombs auf, wenn auch in deutlich geringerem Maße. Abbildung 4.48 zeigt die Profilometermessungen der Oberfläche zweier Sandwichpanels mit Honeycomb- bzw. Noppenwabenkern bei einer Plattendicke von 10 mm. Die Messungen wurden mit einem Dektak 8-Profilometer des Herstellers Veeco [G4] durchgeführt, welcher die Oberfläche der Probe mit einer feinen Messnadel abtastet und daraus eine Oberflächentopographie errechnet und darstellt. Anhand

der Abbildung 4.48 ist deutlich zu sehen, dass die Oberfläche des links abgebildeten Bauteils mit Honeycombkern deutlich ebener ist als bei dem rechts dargestellten Bauteil mit Noppenwaben als Kernmaterial.

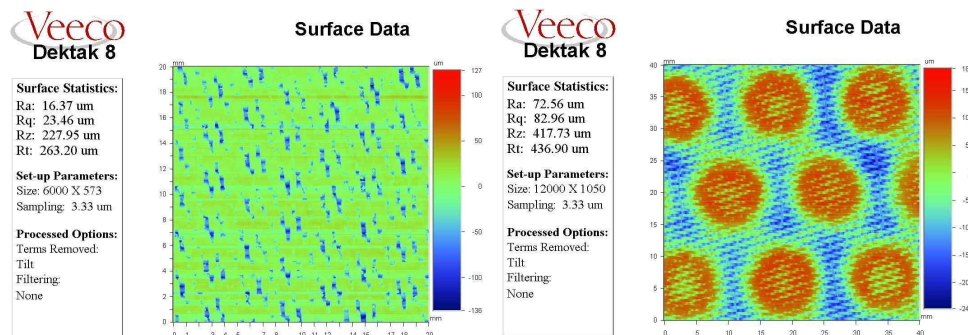


Abb. 4.48: Darstellung der Oberflächentopographie

links: Sandwichpanel mit Honeycomb-Kern (Zellweite 3,2 mm / Messbereich 70x70 mm²)

rechts: Sandwichpanel mit Noppenwabenkern (10 mm Noppendurchmesser / Messbereich 40x40 mm²)

Die in Abbildung 4.48 angegebene mittlere Rautiefe Ra erfasst den mittleren Abstand eines Oberflächenmesspunktes zur Mittellinie zwischen der höchsten Erhebung und der größten Senke innerhalb einer Einzelmessstrecke und berücksichtigt somit die Abweichungen nach oben und unten. Sie entspricht dem „arithmetischen Mittelwert der Beträge der Ordinatenwerte $Z(x)$ innerhalb einer Einzelmessstrecke“ [65]. Dieser Wert liegt beim Noppenwaben-Sandwich mit 72,56 μm um mehr als Faktor 4 höher als beim Referenzbauteil mit der Honeycomb als Kernmaterial. Da für viele Anwendungen eine glatte Oberfläche gewünscht und notwendig ist, besteht ein Ziel der Geometrieentwicklung darin, durch eine optimierte Struktur des Kernmaterials den Telegraphing-Effekt zu verringern.

5 Untersuchungen zu Noppenwaben

5.1 Versuche zur Optimierung der Noppengeometrie

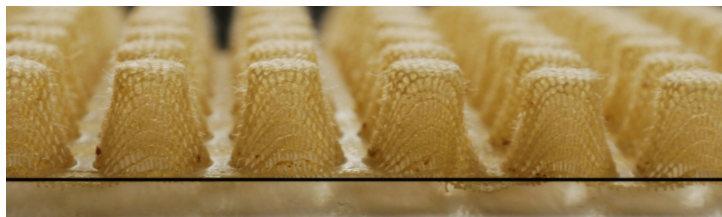
In Abschnitt 4.2.3 wurden Schwachstellen der bestehenden Noppengeometrie, wie die Linienbildung zwischen den Noppen, der ausgeprägte Telegraphing-Effekt an der Bauteiloberfläche sowie die eingeschränkte Drapierbarkeit des Kernmaterials über mehrfach gekrümmte Flächen beschrieben. Es wurden Versuche zur schrittweisen Optimierung der Geometrie durchgeführt, mit dem Ziel diese Schwachstellen zu eliminieren oder zumindest zu reduzieren. Die Versuche werden im Folgenden dargestellt.

5.1.1 Versuche mit zwei Positivwerkzeugen

Abbildung 5.1 oben zeigt eine Noppenwabenstruktur entsprechend dem aktuellen Entwicklungsstand. Wird das Kernmaterial drapiert, verformt es sich um die Ebene der Noppengrundfläche herum, welche durch die eingezeichnete schwarze Linie dargestellt ist. Je nach konkaver oder konvexer Biegung nähern sich die Noppenspitzen einander an oder spreizen sich. Der Abstand an der Noppenbasis bleibt dabei unverändert. Da auf Höhe der schwarzen Linie eine ebene Fläche besteht, kann das Material, vergleichbar mit einem Papierblatt, nicht ohne Einschnitte oder Faltenwurf auf mehrfach gekrümmte Flächen drapiert werden.

In Abbildung 5.1 unten ist eine symmetrische Variante der Noppenwabe zu sehen, welche mit einem Positivwerkzeugpaar, wie in Abbildung 5.2 dargestellt, hergestellt wurde.

einseitige Noppengeometrie



symmetrische Noppengeometrie

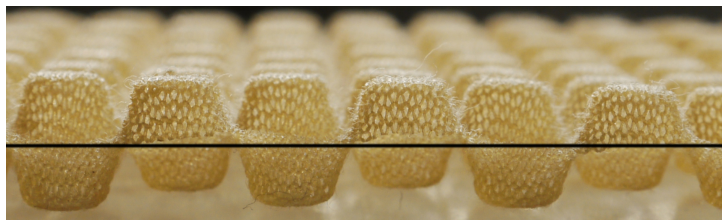


Abb. 5.1: Biegeachsen bei einseitiger und symmetrischer Noppengeometrie

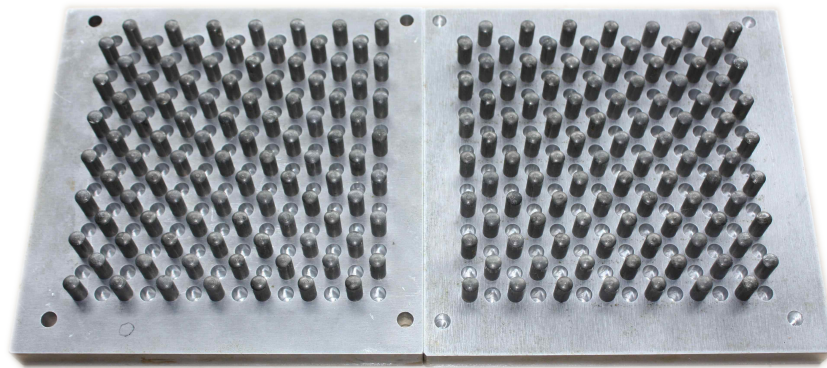


Abb. 5.2: Werkzeugpaar zur Herstellung symmetrischer Noppenwaben

Der Unterschied dieser Struktur gegenüber der einseitigen Noppenwabe liegt in der Translationssymmetrie zur Mittelebene. Die Struktur besitzt eine horizontale Symmetrieebene, wobei die Noppen bei der Herstellung alternierend sowohl nach oben als auch nach unten geformt werden.

Die Drapierbarkeit bei zylindrischen oder konischen Flächen ist der einseitigen Geometrie ebenbürtig. Der wesentliche Vorteil einer symmetrischen Noppenwabe liegt darin, dass sich die Noppen bei mehrfach gekrümmten Flächen sowohl auf der Ober- als auch der Unterseite zueinander annähern oder spreizen können. Dadurch lässt sich diese Struktur im Gegensatz zur einseitigen Noppenwabe auch bis zu einem gewissen Grad sphärisch drapieren (s. Abbildung 5.3).



Abb. 5.3: Sphärisch gewölbte Noppenwabe

Ein weiteres Merkmal der symmetrischen Noppenwabe sind die auf beiden Seiten gleich großen Anbindungsflächen an die Decklagen. In Abbildung 5.4 sind schematisch die Kontaktflächen zwischen Textil und Werkzeug dargestellt, die auch den späteren Anbindungsflächen an die Decklagen entsprechen.

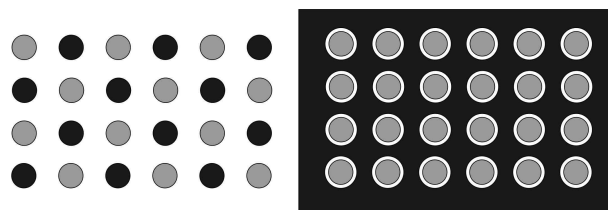


Abb. 5.4: Kontaktflächen zwischen Textil und Werkzeug bei unterschiedlichen Noppengeometrien
links: symmetrische Noppenwabe rechts: einseitige Noppenwabe

Die hellgrau eingefärbten Flächen entsprechen dem Kontakt zur einen, die dunkelgrauen Flächen dem Kontakt zur anderen Werkzeughälfte. Die weißen Bereiche stellen die Bereiche ohne Kontakt zwischen Werkzeug und Textil dar. Die nicht horizontalen Kontakte zwischen Textil und Zylinderstiften bzw. der Negativform werden in dieser vereinfachten Darstellung nicht betrachtet.

Für die Herstellung der symmetrischen Noppenwabe werden zwei Positivwerkzeuge eingesetzt, deren Zylinderstifte das Textil bei der Formgebung zur dreidimensionalen Struktur aufspannen. Dementsprechend beschränken sich die Kontaktflächen zwischen Textil und Werkzeug weitgehend auf die kreisförmigen Stirnflächen der Zylinderstifte.

Bei der einseitigen Noppenwabe, bei der das Textil zwischen Positiv- und Negativwerkzeug verformt wird, sind die Kontaktflächen zum Positivwerkzeug identisch, jedoch liegt das Textil großflächig am Negativwerkzeug an (dunkel dargestellter Bereich in Abbildung 5.4 rechts), wodurch sich die gesamte Kontaktfläche deutlich vergrößert.

Da ein Teil des im imprägnierten Textil enthaltenen Harzes typischerweise am Werkzeug anhaftet, steigt der Entformungsaufwand mit zunehmender Kontaktfläche. Die reduzierte Kontaktfläche zwischen imprägniertem Textil und Werkzeug führt zu einer deutlich besseren Entformbarkeit der symmetrischen Noppenwabe, wodurch der Trennmittelverbrauch reduziert werden kann. Obwohl es sich bei Abbildung 5.4 um eine vereinfachte Darstellung handelt, lassen sich die unterschiedlichen Kontaktflächen beider Varianten deutlich erkennen und die bessere Entformbarkeit der symmetrischen Noppenwabe nachvollziehen.

Mit den in Abbildung 5.5 gezeigten Werkzeuggeometrien werden für die nachstehende Rechnung quadratische Elementarzellen mit einer Kantenlänge von 17 mm betrachtet. Die Werkzeuggeometrie ergibt sich aus den Vorgaben des in Abschnitt 6.3.3 beschriebenen Fertigungsverfahrens, welches eine Teilung der Werkzeugelemente in Abständen von 25,4 mm erfordert. Jede dieser Elementarzellen enthält zwei komplette Noppen ($1 + 4 \cdot 1/4$) (s. Abbildung 5.5).

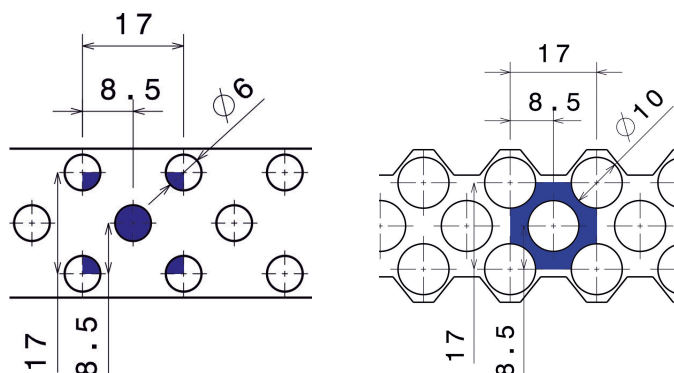


Abb. 5.5: Kontaktflächen zwischen Textil und Werkzeug bei unterschiedlichen Werkzeuggeometrien
links: Positivwerkzeug rechts: Negativwerkzeug

Werden die Kontaktflächen zwischen imprägniertem Textil und Positivwerkzeug berechnet, lässt sich folgende Gleichung aufstellen:

$$A_{\text{positiv}} = 2 \cdot 3^2 \cdot \pi \approx 57 \text{ mm}^2 \quad (5.1)$$

In ähnlicher Weise lässt sich die Kontaktfläche zwischen Prepreg und Negativwerkzeug berechnen.

$$A_{\text{negativ}} = 17^2 - (2 \cdot 5^2 \cdot \pi) \approx 132 \text{ mm}^2 \quad (5.2)$$

Werden die Kontaktflächen addiert, ergibt sich für die symmetrische Noppenwabe, welche mit zwei Positivwerkzeugen hergestellt wird, eine Fläche von ca. 114 mm^2 ($2 \cdot A_{\text{positiv}}$). Dem steht eine Fläche von ca. 189 mm^2 bei der einseitigen Noppenwabe gegenüber ($A_{\text{positiv}} + A_{\text{negativ}}$). Die einseitige Noppenwabe hat im Vergleich zur symmetrischen Variante dementsprechend eine um ca. 66% erhöhte Kontaktfläche zum Werkzeug. In der Praxis bedeutet dies im Fall der symmetrischen Noppenwabe eine leichtere Entformung des ausgehärteten Wabenmaterials sowie einen geringeren Trennmittelverbrauch.

Da die Kontaktflächen zum Werkzeug den späteren Anbindungsflächen an die Decklagen entsprechen, wird der Vorteil einer leichteren Entformbarkeit bei der symmetrischen Noppenwabe mit einer, im Vergleich zur einseitigen Noppenwabe, einseitig verringerten Anbindungsfläche an die Decklage erkauft.

5.1.2 Optimierung der Bauteiloberfläche

Ein Ansatz zur Reduzierung des in Abschnitt 4.2.3 beschriebenen Telegraphings, ist die Realisierung kleinerer Abstände zwischen den tragenden Strukturen, damit auf diese Weise die Decklagen gleichmäßiger gestützt werden. Für eine möglichst ebene Bauteiloberfläche müssen die Decklagen flächig auf dem tragenden Kernmaterial aufliegen bzw. die tragenden Strukturen so eng stehen, dass ein Absinken der Decklagen in den nicht gestützten Bereichen weitgehend minimiert wird.

Neben der Struktur des Kernmaterials ist für die Oberflächenqualität auch die Beschaffenheit der Decklagen von entscheidender Bedeutung. Mit zunehmender Steifigkeit der Decklagen nimmt der Telegraphing-Effekt ab, da das Material sich in den nicht gestützten Bereichen weniger verformt. Üblicherweise geht jedoch eine erhöhte Steifigkeit der Decklage auch mit einem höheren Gewicht einher. Enge Stützabstände im Kernmaterial, die die Verwendung leichter Decklagen bei guter Oberflächenqualität zulassen, bringen andererseits ein erhöhtes Bauteilgewicht aufgrund des schwereren Kerns mit sich und schränken die Drapierbarkeit des Kernmaterials ein. Bei engeren Stegabständen nehmen die Oberflächen sowohl der formgebenden Werkzeuge als auch die der ausgeformten Noppenstruktur zu. Während die Vergrößerung der Werkzeugoberfläche in erster Linie höhere Kosten für die Fertigung sowie die Aufbringung und Erhaltung des Trennfilms verursacht, wird die herstellbare Noppenhöhe durch eine Verringerung der Stützabstände reduziert. Da das Formänderungsvermögen der Textilien begrenzt ist, müssen zwangsläufig Kompromisse eingegangen werden, um für die jeweilige Anwendung ein Optimum aus Kernhöhe, Oberflächenqualität, Bauteilgewicht und Entformungsverhalten zu finden.

Wie im nächsten Abschnitt beschrieben, wurden Versuche mit einem kleiner skalierten Werkzeug durchgeführt, um den Einfluss der Stützabstände an einem Sandwichbauteil mit Noppenwabenkern zu überprüfen.

Versuche mit kleiner skaliertem Werkzeug

Erste Versuche zur symmetrischen Noppenwabe wurden mit einem Positivwerkzeugpaar mit 6 mm-Zylinderstiften und einem leichten Hybridgestrick mit einem Flächengewicht von 90 g/m^2 durchgeführt. Das Textil besteht aus 80 % Aramid sowie 20 % Polyester und wird von der Riedel Textil GmbH hergestellt und vertrieben. Die verwendete Werkzeuggeometrie ist in Abbildung 5.6 dargestellt.

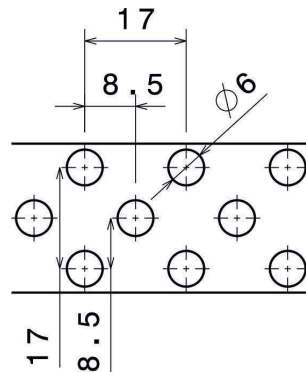


Abb. 5.6: Geometrie des Positiv-Werkzeugs mit 6 mm-Zylinderstiften zur Herstellung von Noppenwaben

Um enge Stützabstände zu realisieren und die Oberflächenqualität der Sandwichbauteile zu verbessern, wurden weitere Versuche mit einem kleiner skalierten Werkzeugpaar zur Fertigung symmetrischer Noppenwaben durchgeführt. Im Vergleich zum ersten Versuchswerkzeug mit einem Stiftdurchmesser von 6 mm wurde das zweite Werkzeugpaar um den Faktor zwei herunterskaliert. Eine Gegenüberstellung beider Werkzeugvarianten inklusive der damit hergestellten Noppenwaben ist in Abbildung 5.7 zu sehen.



Abb. 5.7: Vergleich der beiden Werkzeugpaare mit 6 mm und 3 mm-Zylinderstiften

Erste Versuche mit dem kleiner skalierten Werkzeugpaar zeigten vielversprechende Ergebnisse hinsichtlich der Oberflächenqualität und des Telegraphing-Effekts, jedoch limitiert die begrenzte Verformbarkeit der textilen Maschenware die erreichbare Noppenhöhe. Je enger die Noppen stehen, desto stärker muss das Textil gedehnt werden, um eine identische Noppenhöhe zu erreichen. In den Abschnitten 5.2.2 und 5.2.3 wird beschrieben, in welchem Maße sich das Textil in Abhängigkeit von der verwendeten Werkzeuggeometrie verformen muss. Dabei wird deutlich, dass sich die Werkzeuge nicht beliebig herunterskalieren lassen, da die Textilien ab einem gewissen Grad der Verformung an ihre Grenzen stoßen. Wann diese Grenzen erreicht werden, hängt dabei in hohem Maße vom verwendeten Textil, bzw. dem verwendeten Material und der Maschenbindung ab. Mit dem verwendeten Textil, einem Gestrick mit 80 % Aramid 20 % Polyester und einem Flächengewicht von 90 g/m^2 ,

ließen sich mit dem kleiner skalierten Werkzeug mit 3 mm-Stiften lediglich Noppenhöhen von ca. 4 mm erreichen, was einem vergleichsweise hohen Raumgewicht von ca. 70 kg/m^3 entsprach. Auch der Entformungsaufwand im Vergleich zur ursprünglichen Geometrie stieg durch die höhere Kontaktfläche zwischen Textil und Werkzeug deutlich. Aufgrund der beschriebenen Erkenntnisse wurde für die weiteren Arbeiten die Geometrie mit 6 mm-Zylinderstiften gewählt.

Kombination von Noppenwabe mit Honeycombs zur Verbesserung der Bauteiloberfläche

Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, bringt die Verwendung eines kleiner skalierten Werkzeugs eine Reihe von Nachteilen mit sich, weshalb dieser Weg nicht weiter verfolgt wurde. Es gilt Alternativen zu finden, eine möglichst flächige Unterstützung der Decklagen und dadurch eine Verringerung des Telegraphing-Effekts zu erreichen. Eine Möglichkeit ist, dünne Honeycombs mit Noppenwaben zu kombinieren. Ein solches Bauteil ist in Abbildung 5.8 dargestellt.

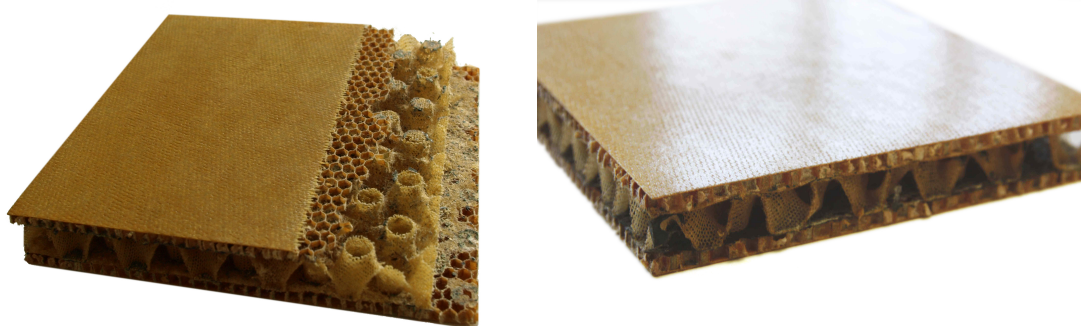


Abb. 5.8: Sandwichplatte mit Noppenwabe und Honeycomb als Kernmaterial (Beschädigte Noppenwaben durch das Abfräsen der Honeycombs)

Der gezeigte Aufbau verbindet die Vorteile von Noppenwaben und Honeycombs. Die sehr dünnen Honeycombs lassen sich wie die Noppenwabe gut drapieren, wodurch sich die Kombination der beiden Wabenmaterialien auch für gekrümmte Sandwichteile anwenden lässt. Weitere Vorteile, wie die offene Struktur und die damit gegebene Drainierbarkeit oder Möglichkeit zur Belüftung sowie die Option Leitungen zu verlegen, ergeben sich aus dem Einsatz der Noppenwabe. Der Nachteil des ausgeprägten Telegraphings wird hingegen durch die engen Unterstützungsabstände der Honeycombs eliminiert. Gegenüber einem reinen Honeycomb-Sandwich ergibt sich ein Kostenvorteil, da der Materialeinsatz der teureren Honeycomb reduziert werden kann.

5.2 Untersuchung der Textilverformung bei einseitiger und symmetrischer Geometrie

Bei der Formänderung zur Noppenwabe vergrößert sich die Fläche des Textils, wobei der Grad der Verformung von der Noppengeometrie, dem Abstand der Noppen zueinander und von der Noppenhöhe abhängt. Bei der Formgebung werden die Maschen des Textils verstreckt und die Noppen ausgeformt, wie in Abbildung 5.9 zu sehen ist.

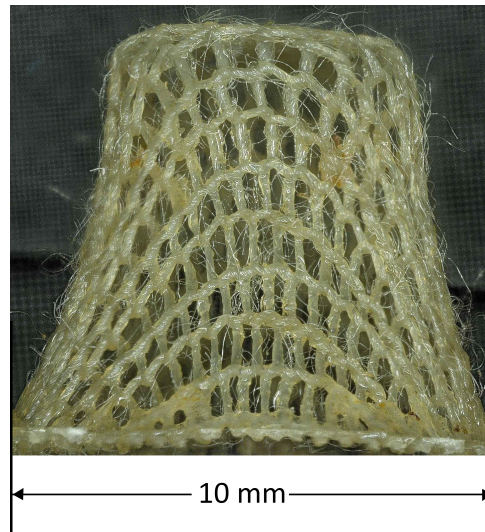


Abb. 5.9: Einseitige Noppenwabe bei 50-facher Vergrößerung aufgenommen

Zusammenhänge zwischen Größe und Anordnung der Noppen sowie den mechanischen Kennwerten wurden bereits im WKP Abschlussbericht „Harzentwicklung und Weiterentwicklung der Noppenwabe - Schnelle Prepreg-Systeme (Förderkennzeichen 03WKP06A)“ im Kapitel „AP 2.3 Weiterentwicklung der Noppenwabe“ beschrieben. Im Rahmen der dazu durchgeführten Untersuchungen wurde die in Abbildung 4.44 dargestellte dreieckige Anordnung der Noppen ermittelt, welche die Dehnfähigkeit des Gestricks besser ausnutzt und die Noppendichte erhöht [66].

Um Unterschiede in der Textilverformung bei symmetrischer und einseitiger Noppenwabe zu untersuchen wird die Formänderung der Textilien bei verschiedenen Konfigurationen berechnet. Für die Berechnungen werden die Noppen vereinfacht als Kegelstümpfe betrachtet. Die Verformung des Textils bei unterschiedlichen Noppengeometrien und -höhen soll im Folgenden beschrieben werden.

5.2.1 Einseitige Noppe mit Positiv-/Negativwerkzeug - Flächige Betrachtung der Formänderung

Bei der Formgebung des Textils mit Positiv- und Negativwerkzeug lassen sich, wie oben erwähnt, unterschiedliche Anordnungen realisieren, von denen zwei Varianten im Folgenden betrachtet werden. Untersucht werden sowohl eine quadratische Anordnung der Noppen als auch eine dichtere Anordnung in Form eines gleichseitigen Dreiecks.

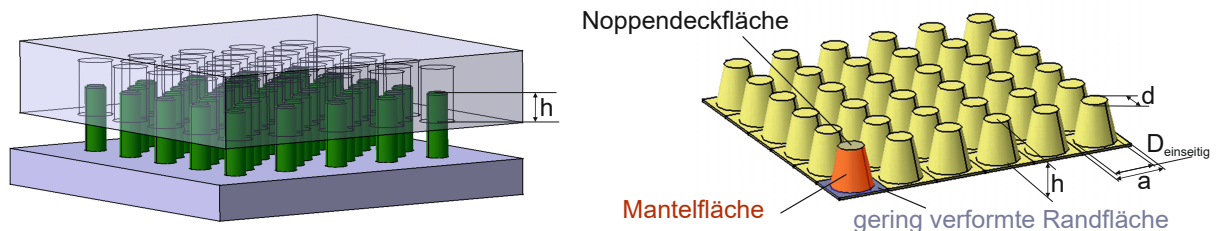


Abb. 5.10: Verformung des Textils bei Einsatz von Positiv- und Negativform (quadratische Anordnung)

Folgende Parameter haben Einfluss auf die Oberfläche.

- Stiftdurchmesser (d)
- Bohrungsdurchmesser im Negativwerkzeug ($D_{\text{einseitig}}$)
- Noppenhöhe (h)
- Zellweite bzw. Abstand der Noppen (a)

Noppen in rechteckiger Anordnung

In Abbildung 5.11 ist eine quadratische Anordnung der Noppen dargestellt. Exemplarisch ist eine Zelle als wiederkehrende Einheit rot eingezeichnet.

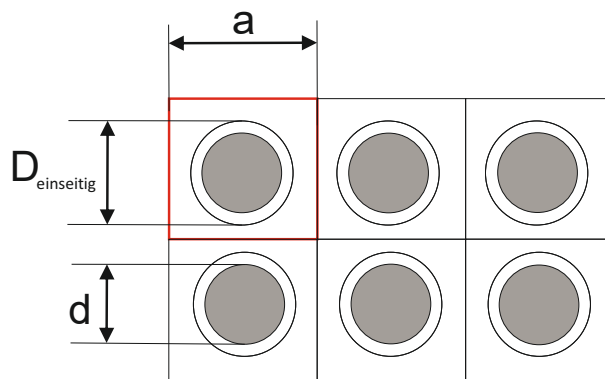


Abb. 5.11: Einheitszellen bei quadratischer Noppenanordnung

Jede Noppe wird, wie in Abbildung 5.10 dargestellt, in vereinfachter Form aus der Mantelfläche eines Kegelstumpfes, der Noppendeckfläche und der gering verformten Fläche zwischen den Noppen gebildet. Die drei Teilflächen lassen sich wie folgt berechnen:

$$A_{\text{Noppendeckfläche}} = \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \pi \quad (5.3)$$

$$A_{\text{Mantelfläche}} = \left(\frac{D_{\text{einseitig}}}{2} + \frac{d}{2}\right) \cdot \pi \cdot \sqrt{\left(\frac{D_{\text{einseitig}}}{2} - \frac{d}{2}\right)^2 + h^2} \quad (5.4)$$

$$A_{\text{gering verformte Randfläche (quadratische Anordnung)}} = a^2 - \left(\frac{D_{\text{einseitig}}}{2}\right)^2 \cdot \pi \quad (5.5)$$

Die Gesamtfläche des verformten Textils ergibt sich aus der Summe der Teilflächen.

$$A_{\text{gesamt}} = A_{\text{Noppendeckfläche}} + A_{\text{Mantelfläche}} + A_{\text{gering verformte Randfläche}} \quad (5.6)$$

Für die Berechnung der Verformung wird die Geometrie der Werkzeuge für das kontinuierliche Ver-

fahren herangezogen (s. Abbildung 5.12), woraus sich folgende Parameter ergeben:

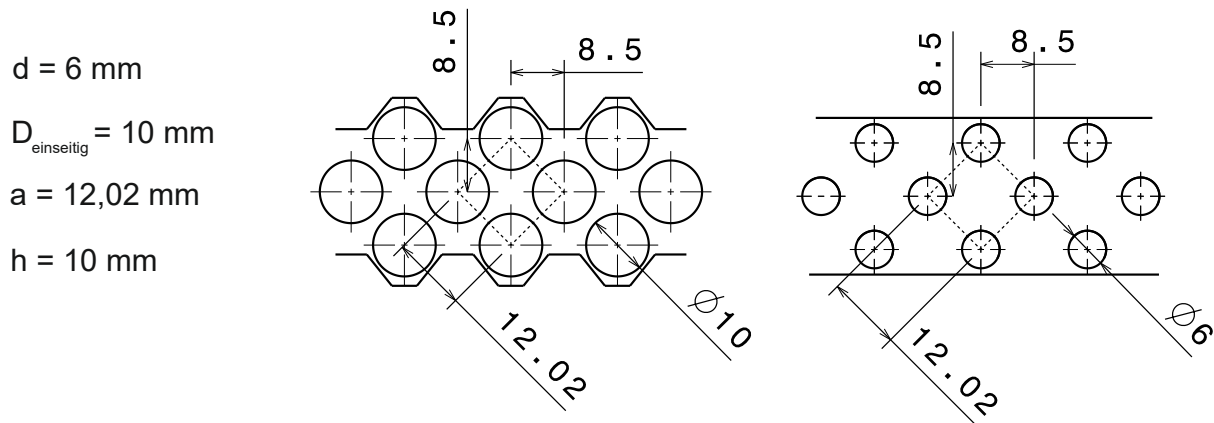


Abb. 5.12: Werkzeugpaar in quadratischer Anordnung
 links: Parameter für die Berechnung der Textilverformung
 mitte: Werkzeuggeometrie des Negativwerkzeugs mit Bohrungen
 rechts: Werkzeuggeometrie des Positivwerkzeugs mit Zylinderstiften

Nach Gleichung 5.6 ergibt sich: $A_{\text{gesamt}} \approx 350 \text{ mm}^2$. Die unverformte Ausgangsfläche beträgt: $A_{\text{unverformt}} = a^2 \approx 144 \text{ mm}^2$. Dies bedeutet eine Änderung der Fläche um den Faktor 2,43.

Noppen in dreieckiger Anordnung

Werden die Noppen in Form eines gleichseitigen Dreiecks angeordnet, ist der Abstand benachbarter Noppen in jede Richtung identisch und sie können dichter angeordnet werden als dies bei quadratischer Anordnung möglich ist. Die dreieckige Anordnung der Noppen ist in Abbildung 5.13 dargestellt. Für die Berechnung der Textilverformung wird in diesem Fall eine hexagonale Zelle als wiederkehrende Einheit gewählt. Die Berechnung der Textilverformung erfolgt analog zur Berechnung bei quadratischer Anordnung.

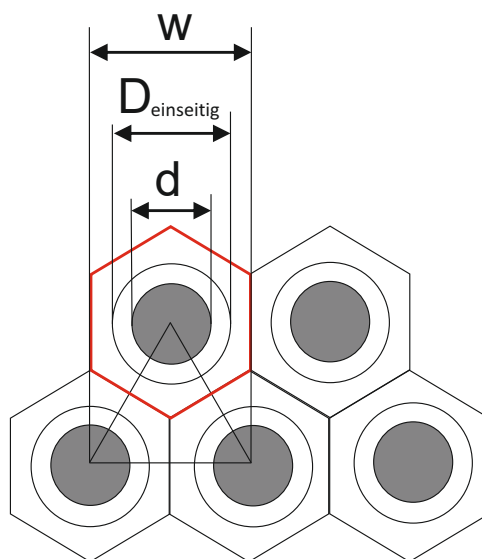


Abb. 5.13: Einheitszellen bei dreieckiger Anordnung

Die Fläche der hexagonalen Einheitszelle berechnet sich wie folgt:

$$A_{\text{Einheitszelle hexagonal}} = \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2} w \right)^2 \cdot \sqrt{3} \quad (5.7)$$

Entsprechend muss die Berechnung der gering verformten Randfläche angepasst werden:

$$A_{\text{gering verformte Randfläche (dreieckige Anordnung)}} = \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{2} w \right)^2 \cdot \sqrt{3} - \left(\frac{D_{\text{einseitig}}}{2} \right)^2 \cdot \pi \quad (5.8)$$

Bei der Wahl identischer Parameter und einem Noppenabstand von $w = 12,02 \text{ mm}$ ergibt sich eine Gesamtfläche der ausgeformten Noppe von $A_{\text{gesamt}} \approx 331 \text{ mm}^2$. Dieser Fläche steht eine unverformte Ausgangsfläche von $A_{\text{Einheitszelle hexagonal}} \approx 125 \text{ mm}^2$ gegenüber. Dies entspricht einer Änderung der Fläche um den Faktor 2,64. Dieser Wert der Flächenänderung liegt deutlich über dem Wert der quadratischen Anordnung (2,43) und weist darauf hin, dass eine dreieckige Noppenanordnung eine wesentlich stärkere Verformung des Textils erfordert, als dies bei quadratischer Anordnung der Fall ist. Bei einer dreieckigen Anordnung lassen sich jedoch mehr Noppen pro Flächeneinheit unterbringen, was eine höhere Festigkeit sowie eine vergrößerte Anbindungsfläche des Kernmaterials auf der Noppenseite an die Decklagen zur Folge hat.

Ausgehend von den festgelegten Parametern mit $a = w = 12,02 \text{ mm}$ ergibt sich bei quadratischer Anordnung eine Grundfläche der Einheitszelle von ca. 144 mm^2 , wohingegen die Grundfläche der hexagonalen Zelle ca. 125 mm^2 beträgt. Im Vergleich zur quadratischen Anordnung, erlaubt eine dreieckiger Anordnung eine um ca. 15% erhöhte Anzahl von Noppen pro Fläche.

5.2.2 Einseitige Noppe mit Positiv-/Negativwerkzeug - Betrachtung der Formänderung in der xz-Ebene

Bei Maschenwaren geht eine hohe Verformbarkeit in eine Richtung stets zu Lasten der Verformbarkeit in die dazu senkrechte Richtung. Aus diesem Grund erfordert eine Dehnung in x,y und z-Richtung (s. Abbildung 5.14) eine höhere Kraft, als die anteilige Verformung in nur eine Richtung. Im Sinne einer Kompensation besteht die Möglichkeit das Textil in eine oder mehrere Richtungen zu raffen, um das Textil bei der Verformung zu entlasten, die Dehnung zu reduzieren und größere Noppenhöhen zu erreichen bzw. das Textil bei gleicher Noppenhöhe weniger zu dehnen. Die imprägnierte Maschenware wird, wie in Abbildung 5.14 gezeigt, im Positivwerkzeug gerafft. Dieser Prozess erfolgt mit Hilfe von Blechstreifen oder vergleichbarer Hilfsmittel, mit denen zwischen jeder Stiftpfalte Falten im Textil erzeugt werden. Die Falten werden nacheinander eingebracht, damit das Prepreg sukzessive nachrutschen kann. Durch die Raffung wird die Verformung der Maschenware stark reduziert, was eine textilschonende Formänderung zur Noppenwabe ermöglicht.

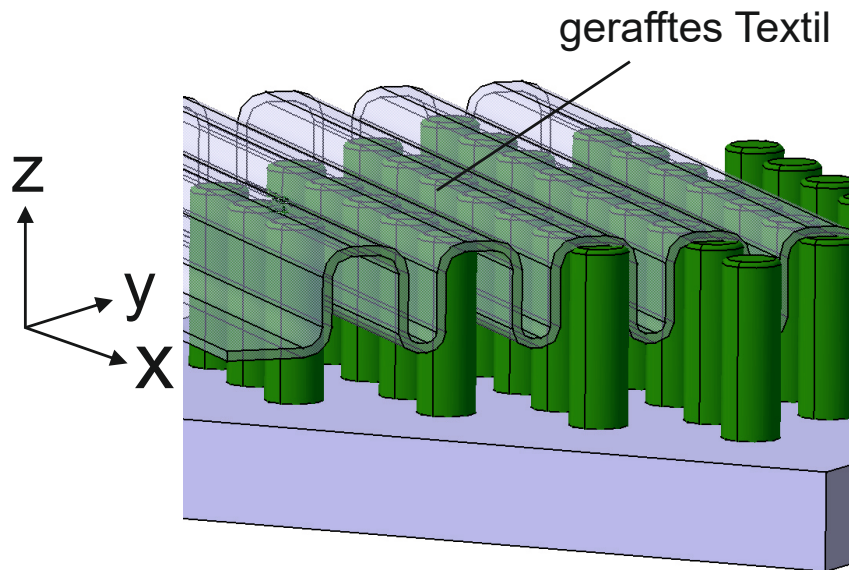


Abb. 5.14: Positivwerkzeug mit gerafftem Textil

Bei der Raffung des Textils in y-Richtung (siehe Abbildung 5.14) genügt eine Dehnung parallel zu den gerafften Falten (in xz-Ebene), um die Noppen auszuformen. Besonders bei anisotropen Textilien bringt dies einen großen Vorteil.

Für eine kontinuierliche Produktion kann ein Textil gewählt werden, welches quer zur Produktionsrichtung stark elastisch ist und die Defizite in Längsrichtung durch ein stetes Raffen am Textileinzug bzw. schnelleres Nachfördern des Textils ausgeglichen werden können. Die maximal erreichbare Noppenhöhe hängt dann wesentlich von der Verformbarkeit in Querrichtung (xz-Ebene) ab.

Im Folgenden soll die Formänderung in der xz-Ebene betrachtet werden. Hierbei wird eine Raffung des Textils in y-Richtung angenommen, sodass keine weitere Dehnung in diese Richtung erfolgen muss. Die Parameter sind im Folgenden aufgelistet und in Abbildung 5.15 dargestellt:

$$h = 10 \text{ mm}$$

$$d = 6 \text{ mm}$$

$$D_{\text{einseitig}} = 10 \text{ mm}$$

$$a = 12 \text{ mm}$$

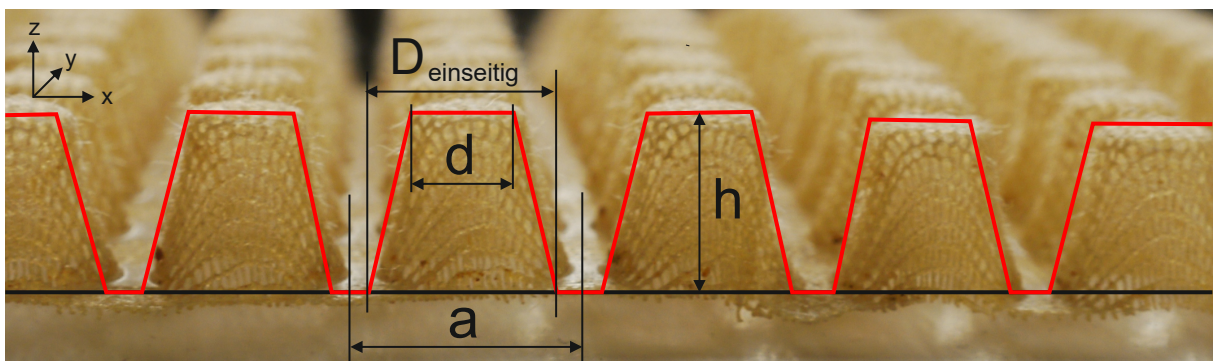


Abb. 5.15: Lineare Verformung des Textils bei Einsatz von Positiv- und Negativform

Die schwarze Linie stellt die unverformte Breite des Textils dar. Die rote Linie orientiert sich an den ausgeformten Noppen und zeigt näherungsweise die Formänderung des Textils in der xz-Ebene. Der Vergleich beider Linielängen gibt Auskunft über die Verformung des Textils.

Die Zellweite, bzw. der Abstand der Zylinderstifte zueinander wird durch die Strecke a dargestellt und entspricht zugleich der unverformten Länge des Textils. Die Länge der roten Linie ergibt sich aus den beiden Flanken und dem Durchmesser der Noppendeckfläche d .

$$L_{Flanke} = \sqrt{\left(\frac{D_{einseitig} - d}{2}\right)^2 + h^2} \quad (5.9)$$

$$L_{verformt} = (a - D_{einseitig}) + 2 \cdot L_{Flanke} + d \quad (5.10)$$

Berechnet man die Länge mit den soeben genannten Parametern, so ergibt sich eine Länge von 28,4 mm. Dem steht die unverformte Ausgangslänge von 12 mm gegenüber. Das geraffte Textil muss sich demzufolge in der xz-Ebene um den Faktor 2,36 dehnen. Bei flächiger Dehnung des unge-
rafften Textils beträgt der Faktor, wie in 5.2.1 gezeigt, den Wert 2,43.

5.2.3 Symmetrische Noppe mit 2 Positivwerkzeugen - Flächige Formänderung

Die Geometrie der symmetrischen Noppenwabe zeichnet sich durch eine identische Topographie auf der Ober- und Unterseite des Kernmaterials aus. Diese Eigenschaft limitiert die Anordnung der Noppen dahingehend, dass jede Noppe von entgegengesetzt orientierten Noppen umgeben sein muss. Abbildung 5.16 veranschaulicht diesen Sachverhalt. Die weißen Noppen sind in diesem Fall nach oben, die grauen Noppen nach unten gerichtet.

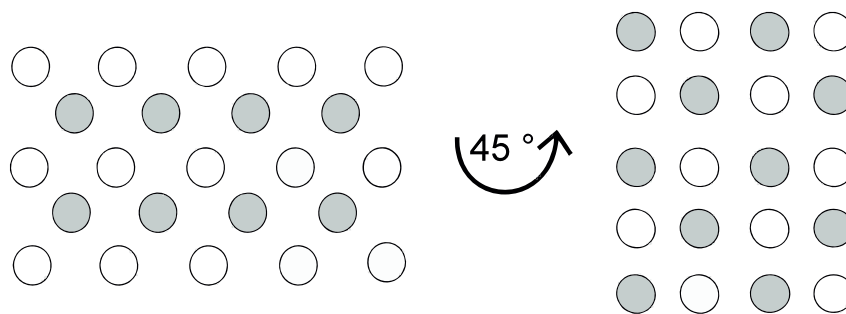


Abb. 5.16: Noppenanordnung bei der symmetrischen Noppenwabe, rechter Teil der Abbildung entspricht dem linken Muster um 45 ° gedreht (weiß: nach oben gerichtet grau: nach unten gerichtet)

Folgende Parameter haben Einfluss auf die Oberfläche des Kernmaterials, bzw. die Flächenänderung des Textils (s. Abbildung 5.17 und 5.18):

- Stiftdurchmesser (d)
- Noppenhöhe (h)
- Zellweite (a_{symm}) = Unterer Durchmesser der Noppe (D_{symm})

Für eine vereinfachte rechnerische Betrachtung wird nur die obere oder untere Hälfte der Noppenwabe herangezogen. Hierbei wird jede Noppe als einzelne „Zelle“ erfasst, wobei die Zellweite „ a_{symm} “ und die Höhe „ $h/2$ “ beträgt.

Jede Noppe, bzw. jede Noppenzelle wird in diesem vereinfachten Modell aus den rot eingefärbten Flächen eines Kegelstumpfes, der grau eingefärbten Noppendeckfläche und den blau dargestellten Randflächen der Zelle zwischen den Noppen gebildet (s. Abbildung 5.18). Die Noppendeckfläche wird für die vereinfachte Betrachtung als eben angenommen und lässt sich näherungsweise als Kreisfläche berechnen.

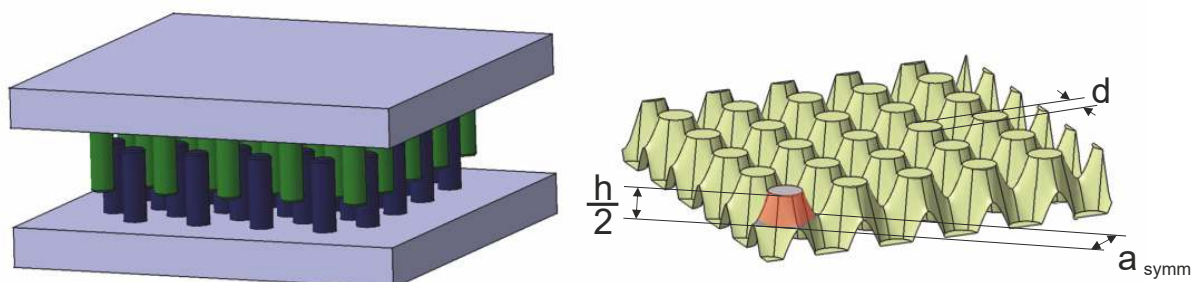


Abb. 5.17: Verformung des Textils bei Einsatz von zwei Positivwerkzeugen

Abbildung 5.18 zeigt die Draufsicht auf eine symmetrische Noppenwabe mit Noppenabstand a_{symm} und dem Durchmesser d der formgebenden Zylinderstifte.

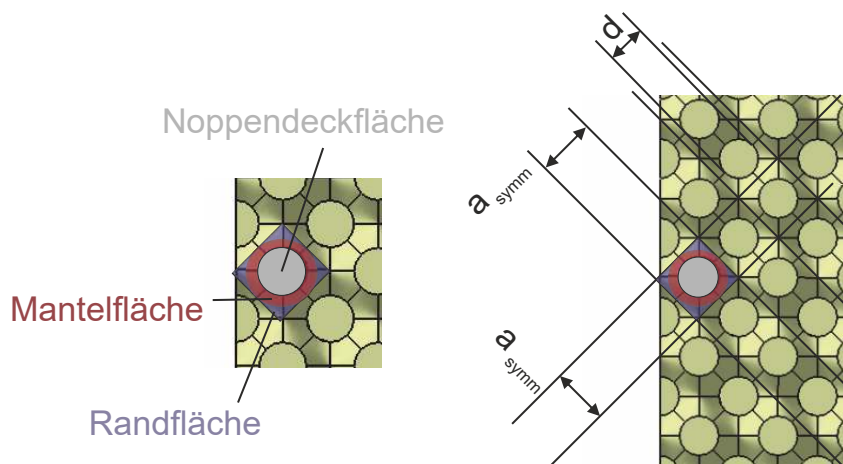


Abb. 5.18: Draufsicht auf eine symmetrische Noppenwabe mit Zellweite a_{symm} und Durchmesser d der formgebenden Zylinderstifte

$$A_{Noppendeckfläche} = \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \pi \quad (5.11)$$

Der rote Bereich stellt die Mantelfläche der Noppe dar und wird mit der Formel für die Mantelfläche eines Kegelstumpfes errechnet. Da jedoch nur der in Abbildung 5.17 rot markierte Bereich betrachtet wird, wird für die Höhe $\frac{h}{2}$ eingesetzt.

$$A_{Mantelfläche} = \left(\frac{D_{symm}}{2} + \frac{d}{2}\right) \cdot \pi \cot \sqrt{\left(\frac{D_{symm}}{2} - \frac{d}{2}\right)^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2} \quad (5.12)$$

Die blauen Bereiche ergeben sich aus der Grundfläche der Zelle abzüglich der projizierten Noppengrundfläche.

$$A_{Randfläche} = a_{symm}^2 - \left(\frac{D_{symm}}{2}\right)^2 \cdot \pi \quad (5.13)$$

Die Gesamtfläche des verformten Textils ergibt sich daher aus:

$$A_{gesamt} = A_{Noppendeckfläche} + A_{Mantelfläche} + A_{Randfläche} \quad (5.14)$$

Dem steht im Ausgangszustand die unverformte Fläche des Textils $A_{unverformt} = a_{symm}^2$ gegenüber. Bei einer exemplarischen Rechnung mit folgenden Parametern ($d = 6 \text{ mm}$, $a_{symm} = D_{symm} = 8,5 \text{ mm}$) lässt sich erkennen, um welchen Faktor das Textil sich verformen muss, um die gewünschte Noppenhöhe zu realisieren. Neben der beschriebenen Ermittlung der Textilverformung wurde zum Vergleich ein CAD-Modell erstellt, bei dem sich die Oberfläche der Struktur messen lässt. Das Modell ist exemplarisch für eine Noppenhöhe von 10 mm in Abbildung 5.19 dargestellt. Die Ergebnisse beider Berechnungsmethoden sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

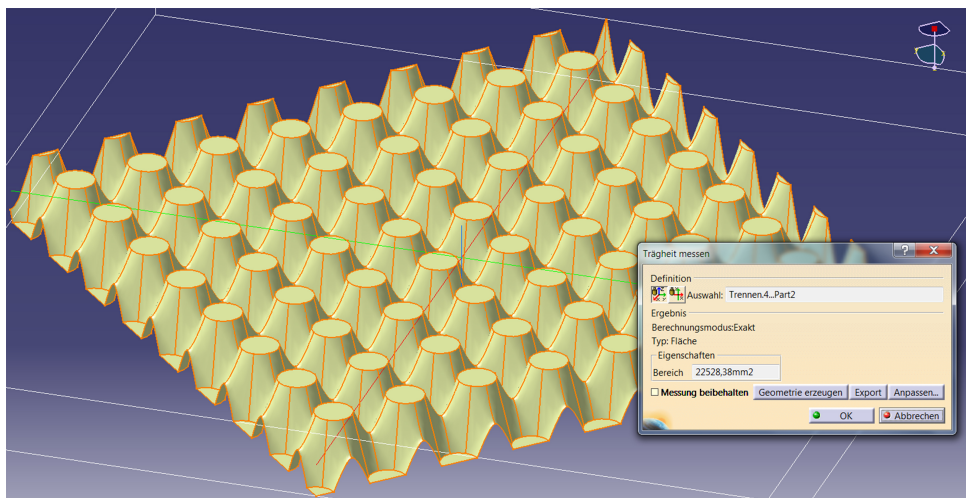


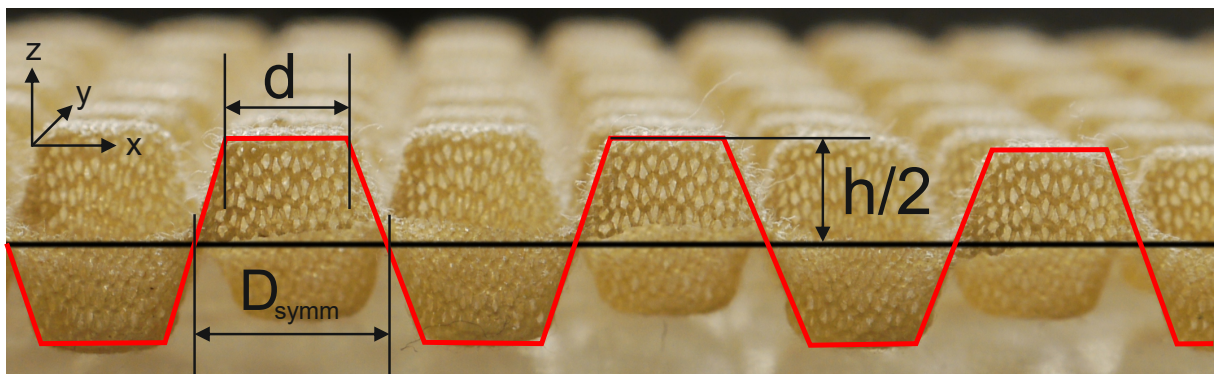
Abb. 5.19: Ermittlung der Oberfläche im CAD-Modell

Tab. 5.1: Vergleich der Textilverformung zwischen Berechnung und CAD-Modell

Noppenhöhe h	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	20	25	30
Berechnete Verformung	1	1,03	1,11	1,22	1,35	1,49	1,63	1,78	1,93	2,08	2,23	2,38	2,54	2,69	2,85	3	3,78	4,57	5,35
Im CAD-Modell ermittelte Verformung	1	1,03	1,10	1,21	1,33	1,48	1,62	1,78	1,93	2,09	2,25	2,41	2,58	2,74	2,90	3,06	3,84	4,60	5,34

5.2.4 Symmetrische Noppe mit 2 Positivwerkzeugen - Betrachtung der Formänderung in der xz-Ebene

In gleicher Weise wie bei der einseitigen Noppenwabe (s. Kapitel 5.2.2) wird auch an dieser Stelle die Formänderung eines gerafften Textils in der xz-Ebene betrachtet. Abbildung 5.20 stellt die Formänderung der symmetrischen Noppenwabe in der xz-Ebene dar.

**Abb. 5.20:** Formänderung der symmetrischen Noppenwabe in der xz-Ebene

Die schwarze Linie stellt die ursprüngliche Breite des Textils dar. Die rote Linie orientiert sich an den ausgeformten Noppen und entspricht näherungsweise der verformten Breite des Textils. Der Vergleich beider Linienlängen gibt Auskunft über die Verformung des Textils in der xz-Ebene.

$$h = 10 \text{ mm}$$

$$d = 6 \text{ mm}$$

$$D_{\text{symm}} = 8,5 \text{ mm}$$

Mit den bereits im vorangehenden Beispiel verwendeten Parametern lässt sich die Längenänderung wie folgt berechnen:

$$L_{\text{Flanke}} = \sqrt{\left(\frac{D_{\text{symm}} - d}{2}\right)^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2} \quad (5.15)$$

$$L_{\text{verformt}} = 2 \cdot L_{\text{Flanke}} + d \quad (5.16)$$

D_{symm} entspricht in diesem Fall der Zellweite und zugleich der unverformten Länge des Textils. Die verformte Länge ergibt sich aus den beiden Flanken und dem Durchmesser der Noppendeckfläche d . Berechnet man die verformte Länge mit den oben genannten Parametern, so ergibt sich eine Länge

von 16,31 mm. Die unverformte Ausgangslänge beträgt 8,5 mm. Das Textil muss sich demzufolge um den Faktor 1,9 dehnen. Bei flächiger Verformung ohne vorheriges Raffen des Textils beträgt der Faktor 2,23, wie in Abschnitt 5.2.3 gezeigt wurde.

Die berechneten Verformungsfaktoren der unterschiedlichen Geometrien und Noppenanordnungen sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

Tab. 5.2: Textilverformung bei der Formgebung zur Noppenwabe

Parameter: $h = 10 \text{ mm}$, $d = 6 \text{ mm}$, $a_{\text{symm}} = D_{\text{symm}} = 8,5 \text{ mm}$, $D_{\text{einseitig}} = 10 \text{ mm}$, $a = w = 12,02 \text{ mm}$	Verformungsfaktor
Noppenwabe einseitig, dreieckig, flächig	2,64
Noppenwabe einseitig, quadratisch, flächig	2,43
Noppenwabe einseitig, xz-Ebene	2,36
Noppenwabe symmetrisch, flächig	2,23
Noppenwabe symmetrisch, xz-Ebene	1,92

Es wird deutlich, dass mit einer symmetrischen Noppenstruktur identische Noppenhöhen bei geringerer Verformung des Textils erreicht werden können. Darüberhinaus lässt sich durch vorheriges Raffen des Textils die Verformung der Maschenware weiter reduzieren, sodass mit vorgerafftem Textil und symmetrischer Noppenstruktur, bei ansonsten gleichen Parametern, die Verformung des Textils am geringsten ist.

6 Entwicklung eines Fertigungskonzepts zur kontinuierlichen Herstellung von Noppenwaben

Basierend auf den in Kapitel 5 beschriebenen Untersuchungen zu Noppenwaben wird in Kapitel 6 die Entwicklung eines Fertigungskonzepts zur kontinuierlichen Herstellung von Noppenwaben dargelegt. Aufbauend auf dem etablierten diskontinuierlichen Fertigungsverfahren wurden mehrere Konzeptideen erarbeitet und miteinander verglichen.

In stark vereinfachter Form sind die in Abbildung 6.1 dargestellten Arbeitsschritte notwendig, um textile Noppenwaben mit duromerer Harzmatrix herzustellen.

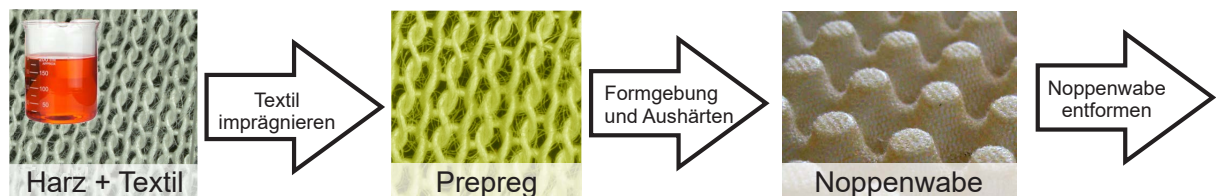


Abb. 6.1: Notwendige Fertigungsschritte zur Herstellung einer textilen Noppenwabe mit duromerer Harzmatrix

Die Imprägnierung von Textilien mit duromeren Harzen ist bereits Stand der Technik, sodass auf diesen Arbeitsschritt im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter eingegangen wird. Der Schwerpunkt der Entwicklung liegt demzufolge auf einer kontinuierlichen Formgebung und Aushärtung des imprägnierten Textils - im Folgenden als Prepreg bezeichnet. Zur Herstellung eines formstabilen Kernmaterials, muss das Prepreg nach der Formgebung zur Noppenwabe in Form gehalten werden, während die Harzmatrix aushärtet und die Struktur stabilisiert. Da bei dem bisher angewandten diskontinuierlichen Fertigungsverfahren das ausgehärtete Kernmaterial von Hand entformt wird und eine Konfektionierung nicht notwendig ist, besteht weiterhin Entwicklungsbedarf an einer automatischen Entformung und ggf. Konfektionierung der Noppenwaben. Eine detaillierte Betrachtung der erforderlichen Prozessschritte erfolgt in Abschnitt 6.3, welcher den Aufbau einer Pilotanlage zur kontinuierlichen Herstellung von Noppenwaben zum Inhalt hat.

6.1 Konzeptüberlegungen zur kontinuierlichen Herstellung von Noppenwaben

Die zentrale Herausforderung bei der Entwicklung eines kontinuierlichen Fertigungsverfahrens besteht darin, sämtliche zur Herstellung notwendigen Prozessschritte in einem Fertigungskonzept zu vereinen. Dieses Konzept soll die kontinuierliche Fertigung von Noppenwaben ermöglichen und dabei ausreichend flexibel sein, eine definierte Einstellung verschiedener Noppenhöhen und Geometrien zuzulassen. Weiterhin soll mit dem Konzept der Übergang von der bisherigen Herstellung der Noppenwaben unter Laborbedingungen hin zu einer Fertigung im Produktionsmaßstab aufgezeigt werden. Es wurden verschiedene Fertigungskonzepte erarbeitet, die im Einzelnen vorgestellt und in Abschnitt 6.1.6 miteinander verglichen werden.

6.1.1 Bänder mit Noppenkontur

Mitlaufende Plattenbänder mit Noppenkontur bzw. Bänder mit aufgesetzten, formgebenden Werkzeugen kommen der bisherigen Fertigung mit zwei Werkzeugplatten am nächsten. Für ein kontinuierliches Verfahren müssen die Bänder im Umlaufbetrieb bewegt werden, was eine Umlenkung erfordert. Diese kann mit einem flexiblen Bandmaterial oder alternativ mit einem Gliederband aus Metall oder festem Kunststoff realisiert werden, wie es in Abbildung 6.2 zu sehen ist.

Das imprägnierte Textil wird eben liegend zunächst durch zylindrische Körper in Form gebracht und unmittelbar danach durch einen temperierten Bereich gefördert, in dem die Harzmatrix formstabil ausgehärtet wird. Abhängig von der Länge der Temperierstrecke, der Temperatur und der Bandgeschwindigkeit kann der Aushärtprozess zeitlich variiert werden. Dieses Fertigungsverfahren bietet zwei bedeutende Vorteile: Das Material wird zwischen den Werkzeugbändern durchgehend in Form gehalten und kann zugleich in ebener Position aushärten, was die Herstellung eines Kernmaterials in Plattenform ermöglicht.

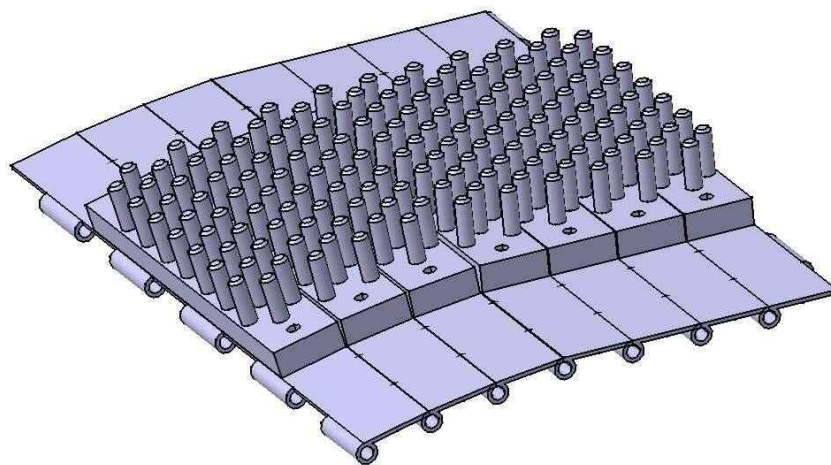


Abb. 6.2: Band mit Positiv-Werkzeugelementen zur Ausformung der Noppenkontur

Die formgebende Kontur kann im Band selber enthalten sein oder durch aufgebraachte Werkzeuge realisiert werden.

Je nach Bestückung der Werkzeugbänder mit Positiv- oder Negativwerkzeugen ist die Herstellung von einseitigen oder symmetrischen Noppenwaben möglich. Abbildung 6.3 zeigt zwei ineinander greifende Werkzeugbänder zur Herstellung symmetrischer Noppenwaben.

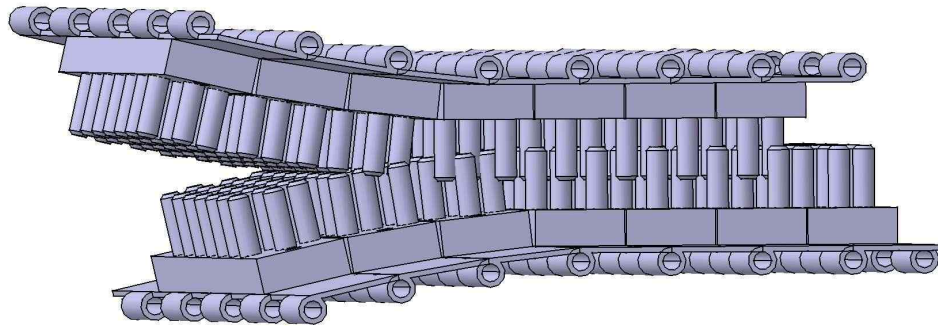


Abb. 6.3: Ineinander greifende formgebende Bänder mit Positiv-Werkzeugelementen zur Herstellung symmetrischer Noppenwaben

6.1.2 Walzenpaar mit Noppenkontur

An Stelle eines Bandes sind auch ein oder mehrere beheizte Walzenpaare denkbar, die der Noppenwabe ihre Form verleihen. Diese greifen, vergleichbar mit Zahnrädern, ineinander und übertragen so die Kontur auf das Prepreg, während das Harz aushärtet. Ein solches Konzept ist in Abbildung 6.4 und 6.5 dargestellt. Ein Nachteil dieser Konstruktion ist der, unabhängig vom Walzendurchmesser, linienförmige Kontakt zwischen den Walzen. Auf diese Weise kommt das Textil nur sehr kurz mit dem Walzenpaar in Berührung und verlässt bei einer kontinuierlichen Fertigung sofort wieder den Kontaktbereich bzw. den Bereich der Formgebung und des Wärmeeintrags zwischen den Walzen.

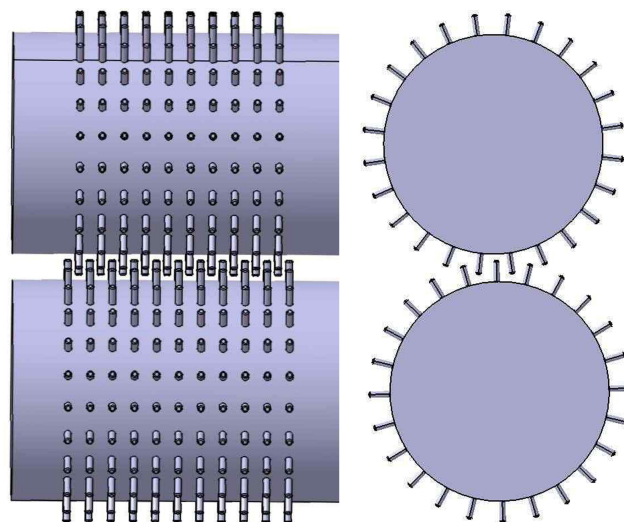


Abb. 6.4: Walzenpaar mit Positiv-Werkzeugelementen

Durch den linienförmigen Kontakt besteht die formgebende Strecke nur aus Einlauf- und Auslaufzone. Die Position der Zylinderstifte zueinander verändert sich permanent, sodass das Textil zu keinem Zeitpunkt in einer definierten Form gehalten wird. Dies führt zu einer ständigen Formänderung des Prepregs während des Aushärtvorgangs, wobei das sich bildende Polymernetzwerk der Matrix zerstört wird. Aus diesem Grund lässt sich zwischen einem Walzenpaar oder auch mehreren hintereinander angeordneten Walzenpaaren keine gleichmäßig ausgeformte Noppenwabe herstellen.

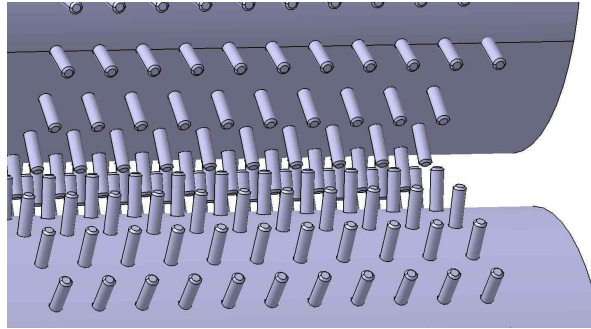


Abb. 6.5: Walzenpaar mit Positiv-Werkzeugelementen - Detailansicht

6.1.3 Tiefziehwalze mit lokalem Unterdruck

Eine weiteres Konzept besteht in einer Walze mit Negativkontur, bei der das Textil durch Unterdruck in die Kontur gesaugt wird und auf diese Weise seine Form erhält. Die Kraft zur Umformung des Materials wird in diesem Fall pneumatisch erzeugt. Das Verfahren wird durch ein Patent für eine „Noppenwalze für die Herstellung von Noppenbahnen“ beschrieben. Dieses Patent bezieht sich auf tiefziehfähige, thermoplastische Folien, die im umgeformten Zustand z.B. in der Begrünungs- oder Drainagetechnik sowie für Be- und Entlüftungsanwendungen eingesetzt werden [55]. Exemplarisch ist eine solche Walze in Abbildung 6.6 dargestellt.

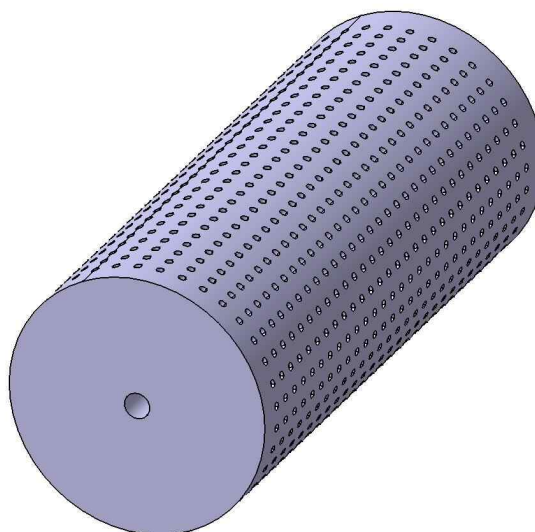


Abb. 6.6: Walze mit negativer Noppenkontur

Obwohl das beschriebene Verfahren erfolgreich zur Herstellung von Noppenbahnen eingesetzt wird, sind die Voraussetzungen beim Tiefziehen thermoplastischer Folie im Vergleich zu einem imprägnierten Textil völlig unterschiedlich. Denn zum einen besitzt eine thermoplastische Folie eine geschlossene und luftundurchlässige Oberfläche, sodass das Material oberhalb seiner Erweichungstemperatur durch Unterdruck problemlos verformt werden kann, zum anderen lässt sich thermoplastisches Material durch Abkühlen sehr schnell in einen formstabilen Zustand verfestigen.

Beide Eigenschaften treffen bei der Verarbeitung eines mit Harz imprägnierten Textils nicht zu. Da es sich bei dem verwendeten Textil um luftdurchlässige Maschenware handelt, die während der Formgebung verstreckt wird, wäre ein deutlich höherer Volumenstrom notwendig, um einen Unterdruck zu erzeugen, der das Textil in die formgebende Kontur des Werkzeugs saugt. Möglicherweise ließe sich durch eine Kaschierung des Textils mit einer luftdichten Folie auf der walzenabgewandten Seite die Formgebung mittels Unterdruck vereinfachen, jedoch besteht sowohl mit als auch ohne Kaschierung die Gefahr, dass Harz aus dem Textil in das Werkzeug gesaugt wird.

Diese Nachteile sind der Grund, warum dieses Konzept zur Fertigung einer textilen Noppenwabe nicht weiter verfolgt wurde, obwohl sich das Verfahren bei der Formgebung von Kunststofffolien bewährt hat.

6.1.4 Walze mit Positivkontur und Netz

Eine weiterer Ansatz zur Erzeugung einer Noppenstruktur, die sich jedoch von den bisherigen Geometrien unterscheidet, ist eine Kombination aus einer Walze mit Positivkontur und einem auf die Noppengeometrie angepassten Netz (s. Abbildung 6.7).

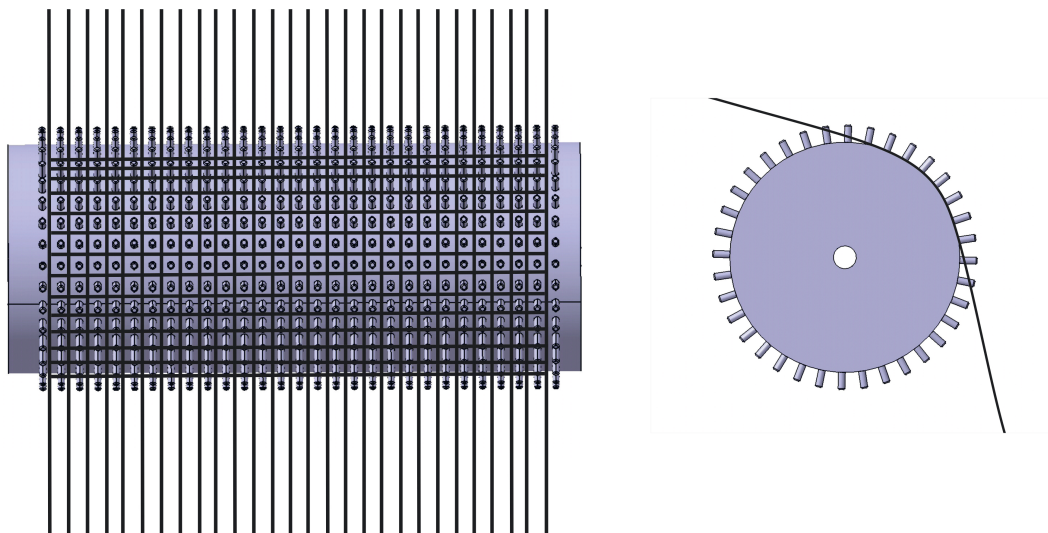


Abb. 6.7: Walze mit Noppenkontur und Netz als Gegenhalter bzw. Negativwerkzeug

Die Zylinderstifte der Walze ragen in diesem Fall durch die Maschen des Netzes, welches das Textil zwischen den Stiften auf die Walze drückt. Für dieses Verfahren muss die Maschenweite des Netzes exakt auf die Noppengeometrie abgestimmt sein. Bei Verwendung eines sehr leichten Netzstoffes könnte das Netz in der Noppenwabe verbleiben, ohne das Gewicht des Kernmaterials wesentlich zu erhöhen. Vorteilhaft gegenüber den anderen Konzepten mit Walzen ist bei dieser Variante die Umschlingung der Walze und die damit verbundene verlängerte Kontaktzeit zwischen Textil und Werkzeug, während der das umzuformende Textil stets flächig an die Walze gedrückt wird. Da das Netz mit der Walze mitgeführt wird, ist im Vergleich zum Walzenpaar keine Relativbewegung zwischen den formgebenden Elementen vorhanden. Die Noppenwabe wird im formstabil ausgehärteten

Zustand mitsamt dem Netz von der Walze abgezogen. Für dieses Verfahren ist eine Walze mit möglichst großem Durchmesser von Vorteil, da die Noppenwabe im Herstellprozess weniger stark gekrümmt wird als bei einer Walze mit kleinem Durchmesser. Weiterhin ist die Kontaktzeit zwischen Textil und Werkzeug bei gleichem Umschlingungswinkel und identischer Bahngeschwindigkeit des Textils länger, sodass bei identischer Aushärtezeit die Produktionsgeschwindigkeit höher ist.

6.1.5 Kombination mehrerer Walzen

Das Problem der sehr kurzen Kontaktzeit bei einem oder mehreren Walzenpaaren kann durch die Kombination mehrerer Walzen relativiert werden. Möglich wäre der Einsatz einer großen Walze, die im ständigen Kontakt mit dem auszuhärtenden Prepreg steht, zusammen mit mehreren kleineren Walzen, die dem Prepreg die Kontur verleihen. Exemplarisch ist ein derartiger Aufbau in Abbildung 6.8 dargestellt.

Vorteilhaft bei diesem Konzept ist die deutlich längere Kontaktzeit zwischen Prepreg und der mittig angeordneten Walze im Vergleich zu einem Walzenpaar oder mehreren Walzenpaaren. Allerdings muss diese Walze über einen entsprechend großen Durchmesser verfügen, um akzeptable Produktionsgeschwindigkeiten zu ermöglichen. Bei einer formgebenden Strecke von 3000 mm Länge entspräche dies bei einem Umschlingungswinkel von 180° einem Walzendurchmesser von ca. 1,9 m.

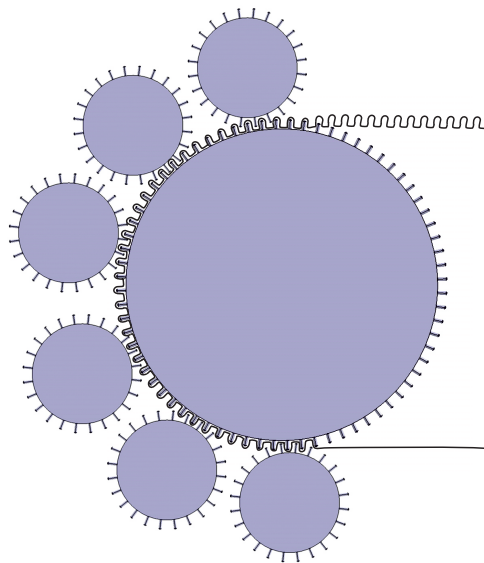


Abb. 6.8: Kombination mehrerer Walzen zur kontinuierlichen Herstellung von Noppenwaben

6.1.6 Vergleich und Bewertung der verschiedenen Konzepte

Die vorgestellten Konzepte wurden mit dem Ziel, das ausgewählte Fertigungskonzept in Form einer Versuchsanlage in die Realität umzusetzen, im Hinblick auf Funktionalität und Fertigungsaufwand miteinander verglichen und bewertet (s. Abbildung 6.9). Die Gewichtungen der jeweiligen Untersuchungskriterien und Kategorien wurden dabei in einem Team an der Noppenwabenentwicklung beteiligter Personen erarbeitet. Hierzu wurden verschiedene Untersuchungskriterien festgelegt, welche den Kategorien Fertigungsaufwand und Funktionalität zugeordnet wurden. Dabei wurde der einmalige, zum Aufbau einer Versuchsanlage notwendige Fertigungsaufwand mit 30%, die Funktionalität des Konzepts mit 70% gewichtet.

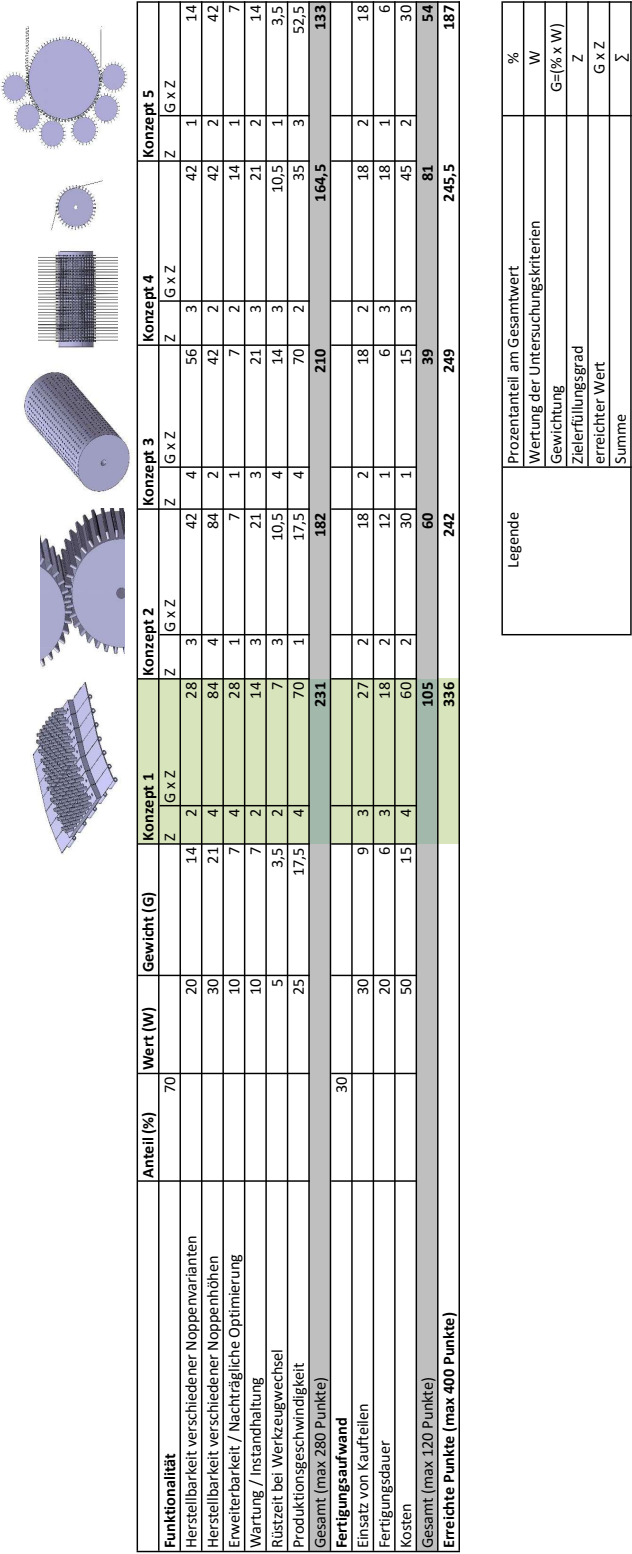


Abb. 6.9: Bewertungsmatrix für den Vergleich der verschiedenen Fertigungskonzepte

Um die Funktionalität des Konzepts zu bewerten, wurden die verschiedenen Untersuchungskriterien ebenfalls mit unterschiedlicher Gewichtung betrachtet (Wertung der Untersuchungskriterien W). Die Summe der Bewertungen in den Bereichen Funktionalität und Fertigungsaufwand ergeben dabei jeweils 100%.

An alle Konzepte besteht die wichtige Anforderung, die Noppengeometrie mit möglichst geringem Aufwand für verschiedene Anwendungen anzupassen. Dies reicht von einer einfachen Änderung der Noppenhöhe, bei ansonsten identischer Geometrie bis hin zu einem veränderten Noppenabstand und/oder -durchmesser. In der Bewertungsmatrix werden dem Begriff „Noppenvarianten“ sämtliche geometrischen Parameter außer der Höhe zugeordnet. Eine schnelle Änderung der Höhe des Kernmaterials ist dabei wichtiger als der schnelle Wechsel auf einen veränderten Noppenabstand und/oder -durchmesser. Aus diesem Grund wird die Herstellbarkeit verschiedener Noppenhöhen mit 30% gewichtet, wohingegen die Herstellbarkeit verschiedener Noppenvarianten lediglich mit 20% in die Bewertung eingeht.

Weiterhin ist bei einer Versuchsanlage die Erweiterbarkeit und die nachträgliche Optimierung relevant, um weitere Funktionen zu integrieren oder bestehende Funktionen ggf. zu optimieren. Dieses Kriterium fließt mit 10% in die Bewertung ein. Ebenso sind Wartung und Instandhaltung bei einer Anlage für ein kontinuierlich arbeitendes Verfahren von Bedeutung, um eine lange Lebensdauer zu gewährleisten. Bei der Versuchsanlage wurden diese Parameter allerdings nur mit 5% gewertet, weil diese Anlage nicht im Dauerbetrieb arbeitet. Ebenso spielt die Rüstzeit bei Werkzeugwechsel nur eine untergeordnete Rolle, da die Werkzeuge nur selten ausgetauscht werden müssen. Aus diesem Grund geht der Faktor Rüstzeit ebenfalls nur mit 5% in die Bewertung ein. Einen hohen Stellenwert hat wiederum die Produktionsgeschwindigkeit, weshalb diese mit 30% gewichtet wird.

Der Fertigungsaufwand zum Aufbau einer Versuchsanlage wurde ebenfalls nach verschiedenen Untersuchungskriterien bewertet. Der Einsatz von Kaufteilen hilft Werkstattkosten und -zeit zu sparen und ist daher in den meisten Fällen einer Fertigung im eigenen Haus vorzuziehen. Dieses Untersuchungskriterium geht daher mit 30% in die Bewertung ein. Die Fertigungsdauer spielt im Vergleich dazu und zu den Kosten eine untergeordnete Rolle und wird mit lediglich 20% gewichtet. Das wichtigste Kriterium für den Aufbau der Versuchsanlage stellen die Kosten dar, die aus diesem Grund mit 50% in die Bewertung eingehen.

Der Zielerfüllungsgrad (Z) der einzelnen Bewertungsfelder reicht von 0 bis 4, wobei Untersuchungskriterien die keinerlei Erfüllung aufweisen mit 0 Punkten gewertet werden. Eine optimale Erfüllung der Anforderung wird mit 4 Punkten bewertet. Die Bewertungsmatrix mit allen Bewertungsfeldern ist in Abbildung 6.9 dargestellt.

Bänder mit Noppenkontur können überwiegend mit kommerziell erhältlichen Teilen realisiert werden. So können beispielsweise Scharnierplattenbänder aus Stahl zum Einsatz kommen, auf die einzelne Segmente mit Zylinderstiften bzw. Bohrungen zur Formgebung aufgebracht sind. Derartige Bänder erfüllen alle Vorgaben hinsichtlich Chemikalien- und Temperaturbeständigkeit bei einem vergleichsweise günstigen Preis. Als weiterer Vorteil ist zu werten, dass Scharnierplattenbänder in verschiedenen Breiten bis maximal 1,2 m erhältlich sind und nachträglich in der Länge geändert werden können, um beispielsweise die Aushärtestrecke anzupassen. Die Noppenhöhe ist durch einen variablen Abstand der Bänder zueinander einzustellen. Weitere Variationen der Noppengeometrie, wie beispielsweise die Änderung der Noppenanordnung oder der Noppendurchmesser sind ohne Werkzeugwechsel nicht möglich. Jedoch können verschiedene Bänder mit unterschiedlichen Noppengeometrien vorgehalten und bei Bedarf ausgetauscht werden.

Bei den Walzenkonzepten lassen sich wie bei den Bändern mit Noppenkontur unterschiedliche Noppenhöhen über den Abstand der Walzen zueinander realisieren. Problematisch bei dem Konzept eines oder mehrerer Walzenpaare ist jedoch die permanente Relativbewegung der formgebenden Elemen-

te, die nur eine undefinierte Formgebung des Textils zulässt und eine gleichmäßige und mechanisch stabile Ausformung der Noppenwabe verhindert.

Das Konzept mit nur einer Walze in Kombination mit einem angepassten Netz vermeidet diese Relativbewegung, bietet jedoch weniger Flexibilität hinsichtlich der Noppengeometrie, da auf diese Weise keine symmetrischen Noppenwaben hergestellt werden können.

Die Fertigung von Walzen mit einem Durchmesser von mindestens 600 mm, wie er für eine akzeptable Produktionsgeschwindigkeit erforderlich ist, ist mit deutlich höherem Aufwand verbunden als der Kauf und die Bearbeitung der Scharnierplattenbänder.

Das Konzept einer Anlage mit parallel laufenden werkzeugbestückten Bändern (Konzept 1) bietet sowohl hinsichtlich der Funktionalität als auch des Fertigungsaufwands die größten Vorteile, weshalb eine Auswahl zu Gunsten dieses Konzepts getroffen wurde. Aufgrund seiner Nähe zum bestehenden diskontinuierlichen Fertigungsprozess können zudem Vorerfahrungen einfließen.

6.2 Materialauswahl für eine Anlage zur kontinuierlichen Herstellung von Noppenwaben

Neben der Erarbeitung verschiedener Fertigungskonzepte wurde eine Recherche zu potentiell geeigneten Werkzeugmaterialien durchgeführt, um das ausgewählte Konzept in die Praxis umzusetzen. Für die Herstellung der Werkzeugbänder wurde neben den bereits bewährten metallischen Werkstoffen nach weiteren Materialien recherchiert. Ein besonderes Augenmerk lag hierbei auf flexiblen Werkstoffen, mit dem Ziel einen Gurt oder ein flexibles Band mit formgebender Oberfläche zu realisieren (s. Abbildung 6.2).

Für die Werkzeuge ist eine Oberfläche mit hoher Trennwirkung, vorzugsweise selbsttrennend, erwünscht. Dies ist dann der Fall, wenn die Werkzeugoberfläche eine niedrige Oberflächenenergie aufweist und nur schlecht vom Harz benetzt werden kann bzw. wenn der Benetzungswinkel groß ist [67]. Idealerweise ist die Oberflächenenergie der Werkzeugoberfläche geringer als die des verwendeten Harzsystems, sodass eine Benetzung möglichst unterbunden wird. Zahlreiche thermoplastische Kunststoffe weisen im Vergleich zu metallischen Werkstoffen eine deutlich geringere Oberflächenenergie auf und werden demzufolge schlechter mit Harz benetzt. Der Zusammenhang zwischen Oberflächenenergie und Benetzung ist in Kapitel 6.4 „Benetzung von Oberflächen durch Klebstoffe“ im Buch „Kleben - Grundlagen, Technologien, Anwendungen“ von G. Habenicht [67] anschaulich dargelegt. Eine Auswahl von Oberflächenenergien verschiedener Werkstoffe ist in Tabelle 6.1 aufgeführt.

Tab. 6.1: Oberflächenenergien ausgewählter Werkstoffe (nach [67])

Werkstoff	Oberflächenenergie σ [mJ/m ²]
Polytetrafluorethylen	18,5
Silikone	24
Polypropylen	29
Polyethylen	31
Polycarbonat	34...37
Polyamid	49...57
Aluminium	1200
Eisen	2550
Wasser	72,8
Epoxidharz	47

Aufgrund der niedrigen Oberflächenenergie benötigen Silikone keinen vorherigen Trennmittelauftrag, um die ausgehärtete Noppenwabe von der formgebenden Struktur abzulösen. Die in der Vergangenheit durchgeführten Versuche mit derartigen Werkzeugen haben gezeigt, dass mindestens eine Seite des Werkzeugs aus festem Material bestehen muss, um die Noppen definiert abformen zu können. Versuche mit einem Positivwerkzeug aus Silikon führten jedoch nicht zum gewünschten Ergebnis, da sich das flexible Material verformt und eine maßhaltige Formgebung des Prepregs nicht gewährleistet ist. Eine Negativform aus Silikon in Kombination mit Metallstiften in der Positivform führte zu guten Ergebnissen, jedoch erwies sich das Silikon als nicht ausreichend chemikalienbeständig. Vor allem die Beständigkeit des Silikons gegenüber polaren Lösungsmitteln, wie z.B. Methylethylketon (MEK) ist nicht gegeben. Abbildung 6.10 zeigt die angegriffene und mittlerweile raue Oberfläche eines anfänglich glatten Silikonwerkzeugs. Mit zunehmender Rauigkeit bleiben mehr Harzreste an der Werkzeugoberfläche hängen und schädigen die Oberfläche des Werkzeugs beim Entformen zusätzlich. Eine chemische Beständigkeit, auch bei höheren Temperaturen um ca. 160°C, ist dringend notwendig für die Herstellung der Noppenwabe mit Cyanat-Harzen, deren Viskosität oftmals mit MEK eingestellt wird.

**Abb. 6.10:** Angegriffenes und mittlerweile raues Silikonwerkzeug (Positivform)

Einen umfangreichen Überblick über verschiedene Elastomere gibt das Werk „General chemical resistance of elastomers“ [68] der Los Angeles Rubber Group. Die Ergebnisse der genannten Veröffentlichung flossen unter anderen in den „Chemical Resistance Guide“ von DuPont ein, einer Online-Datenbank, die eine schnelle Suche geeigneter Materialklassen anhand festzulegender Kriterien erlaubt. Chemisch stabil gegenüber MEK sind demnach nur zwei Elastomerklassen. Hierbei handelt es sich um EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk) und FFKM (Perfluorkautschuk). Aufgrund der unbedingt notwendigen Temperaturbeständigkeit bis 160°C ist EPDM jedoch nicht geeignet, sodass lediglich Perfluorkautschuk als Werkzeugmaterial in Frage kommt. Dieser Werkstoff ist jedoch teuer (ca. 1000 bis 4000 €/kg) und lässt sich nur im Spritzgussverfahren verarbeiten. Aus diesen Gründen fiel die Entscheidung bezüglich der Materialauswahl auf metallische Werkstoffe.

Da Metalle ohne spezielle Oberflächenbehandlung eine hohe Oberflächenenergie aufweisen (s. Tabelle 6.1), ist es erforderlich, die Oberfläche mit Trennmittel oder einer anderen Beschichtung zu modifizieren, damit keine Harzreste anhaften können. Die Beschichtung muss drei Kriterien erfüllen. Sie muss auf Metall haften, gleichzeitig trennend gegenüber den verwendeten Harzen wirken und eine chemische Beständigkeit gegenüber den eingesetzten Medien bis ca. 180°C aufweisen. Hierzu bestehen mehrere Möglichkeiten, eine Beschichtung mit den genannten Eigenschaften auf das Werkzeug aufzubringen, welche im Folgenden kurz erläutert werden.

Variante 1: Harteloxalschicht mit PTFE-Partikeln

Der Prozess des Harteloxierens ist auch unter den Namen „Hartanodisieren“ oder „Hartcoatieren“ bekannt. Dabei wird durch elektrolytische Oxidation des zu behandelnden Aluminiumwerkstoffs eine harte Schutzschicht aus Aluminiumoxid (Al_2O_3) auf der Oberfläche erzeugt. Diese dient in der Regel als Verschleiß- und Korrosionsschutz. In die poröse Oberfläche der Harteloxalschicht können im Anschluss PTFE-Partikel (Polytetrafluorethylen) aufgebracht werden, die sich in den Poren ablagern und die Trennwirkung der Werkzeugoberfläche deutlich verbessern [69]. Das beschriebene Verfahren wird unter dem Namen „Hartcoat®“ beispielsweise durch die Firma AHC Oberflächentechnik GmbH angeboten.

Das Verfahren kann jedoch nur für Aluminiumwerkstoffe eingesetzt werden und ist damit für die verwendeten Zylinderstifte aus 100Cr6-Stahl ungeeignet. Weiterhin besteht das Problem, dass sich die PTFE Partikel bei mechanischer Beanspruchung nach und nach aus der Beschichtung lösen und die Trennwirkung nachlässt. Das Aufbringen einer neuen Eloxalschicht, die ein effizientes Entformen der Noppenwabe ermöglicht, erfordert eine Demontage der Werkzeugelemente und kann daher nicht im laufenden Betrieb geschehen.

Variante 2: Nickel-PTFE-Beschichtung

Eine weitere Variante der Beschichtung ist das chemische Aufbringen einer Nickel-PTFE-Schicht. Hierbei erfolgt der Auftrag der Schutzschicht als chemische Abscheidung ohne äußere Stromquelle. Für den Vorgang wird das Werkstück in eine wässrige Prozesslösung mit einem definierten Gehalt an Nickelionen und PTFE-Partikeln getaucht. Im Prozessverlauf reduzieren sich die Ionen zu Nickelmetall und lagern sich auf dem zu behandelnden Substrat ab. In der Schicht sind 20 - 30 Volumenprozent PTFE homogen verteilt. Die übliche Schichtdicke beträgt 7 - 15 μm , dünnere und dickere Schichten sind ebenfalls möglich [70]. Unter dem Namen „Durnicoat®“ beschichtet die Firma AHC Oberflächentechnik GmbH zahlreiche Materialien nach dem beschriebenen Verfahren. Das Verfahren lässt sich für nahezu alle Metalle und Kunststoffe mit Ausnahme hochlegierter Stähle anwenden. Zu diesen Stählen zählt auch das Material 100Cr6 aus welchem die verwendeten Zylinderstifte bestehen, sodass das beschriebene Verfahren im vorliegenden Fall nicht angewandt werden kann.

Variante 3: Lack mit PTFE-Partikeln

Neben anodischer und chemischer Abscheidung einer Schutzschicht besteht eine dritte Variante darin, einen Lack aufzubringen, um die Benetzung durch die verwendeten Harze zu verringern. Unter dem Namen „SEPA-COAT®“ bietet AHC Oberflächentechnik eine Antihaft-Beschichtung an, die mit nicht näher beschriebenen Antihaftpigmenten versetzt ist und daher als Trennschicht wirkt. Nach der Applikation wird die Beschichtung durch einen Sinterprozess bei 390°C ausgehärtet. Die Schichtdicke liegt üblicherweise bei $40 \pm 15 \mu\text{m}$ [71].

Trotz des Sinterprozesses ist ein solcher Lackauftrag weniger haltbar als chemische oder anodische Beschichtungen, jedoch ist die Anwendung nicht auf bestimmte Metalle beschränkt. Die Haltbarkeitsdauer der Lackierung auf der Werkzeugoberfläche müsste in der Praxis im laufenden Betrieb erprobt werden.

Variante 4: Trennmittel

Der Auftrag eines Trennmittels ist hinsichtlich der Funktionsweise mit einem Lackauftrag vergleichbar. Auch hier findet keine chemische oder anodische Abscheidung auf der Werkzeugoberfläche statt. Im Gegensatz zum Lackauftrag ist die Schichtdicke des Trennmittels deutlich geringer. Ebenso wie bei den bereits beschriebenen Varianten nutzt sich auch die Trennmittelschicht im laufenden Betrieb ab und muss in regelmäßigen Abständen erneuert werden. Im Gegensatz zu dem im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Lack ist jedoch bei den meisten handelsüblichen Trennmitteln keine Temperatur von 390°C zur Aushärtung der Beschichtung erforderlich. Bei den bisher verwendeten Trennmitteln „Frekote HMT2“ der Henkel Corporation und „Mold Release 225“ von der Jost Chemicals GmbH wird das Trennmittel bei Temperaturen von ca. 130°C eingebrannt, was einen problemlosen Auftrag im laufenden Betrieb ermöglicht. In Abhängigkeit des verwendeten Harzsystems muss ein geeignetes Trennmittel ausgewählt werden, um eine gut funktionierende Trennschicht zu erzeugen.

Vergleich der verschiedenen Beschichtungsvarianten

Trotz intensiver Recherche konnte für die Beschichtung der Werkzeugelemente keine bessere Variante als der etablierte Trennmittelauftrag ermittelt werden. Unter Berücksichtigung der verwendeten Materialien, der Beschichtungskosten verbunden mit dem erforderlichen Zeitaufwand und der Langlebigkeit der Beschichtung fiel die Entscheidung zu Gunsten eines Trennmittelfilms, wie er derzeit auch bei der diskontinuierlichen Fertigung der Noppenwabe zum Einsatz kommt. Die verwendeten Zylinderstifte aus 100Cr6-Stahl lassen sich weder eloxieren noch mit einer Nickel-PTFE-Schicht versehen, da der hochlegierte Stahl in der elektrochemischen Spannungsreihe zu nahe an Nickel liegt und der Prozess der Beschichtung aufgrund des geringen Spannungsgefälles zu zeitintensiv wäre. Ein Lack mit PTFE-Partikeln wäre zwar möglich, jedoch nutzt sich auch diese Schicht ab und muss nach einiger Zeit erneuert werden. Ein erneutes Aufbringen der Lackschicht und ein Einbrennen bei 390°C gestaltet sich jedoch extrem aufwändig und lässt sich im laufenden Betrieb nicht realisieren. Im Gegensatz dazu existieren semi-permanente Trennmittel, wie z.B. „Frekote HMT2“ die sich auf heiße Werkzeugoberflächen aufbringen lassen und dort einen Polymerfilm bilden, der vergleichsweise fest auf der Werkzeugoberfläche haftet und mehrere Entformungsvorgänge überdauert. Ein regelmäßiger, ggf. automatisierter Trennmittelauftrag stellt eine einfache Möglichkeit dar, eine problemlose Entformung der Noppenwabe langfristig zu gewährleisten.

6.3 Aufbau von Anlagen für die kontinuierliche Herstellung von Noppenwaben

Das in Abschnitt 6.1.1 beschriebene Konzept zweier parallel laufender Bänder mit Noppenkontur wurde in die Praxis umgesetzt. Dabei wurde ein Versuchswerkzeug über mehrere Zwischenschritte zu einer Versuchsanlage und schließlich zur Pilotanlage weiterentwickelt. Die aufeinanderfolgenden Entwicklungsstufen bis zur Pilotanlage sind in Abbildung 6.11 dargestellt.

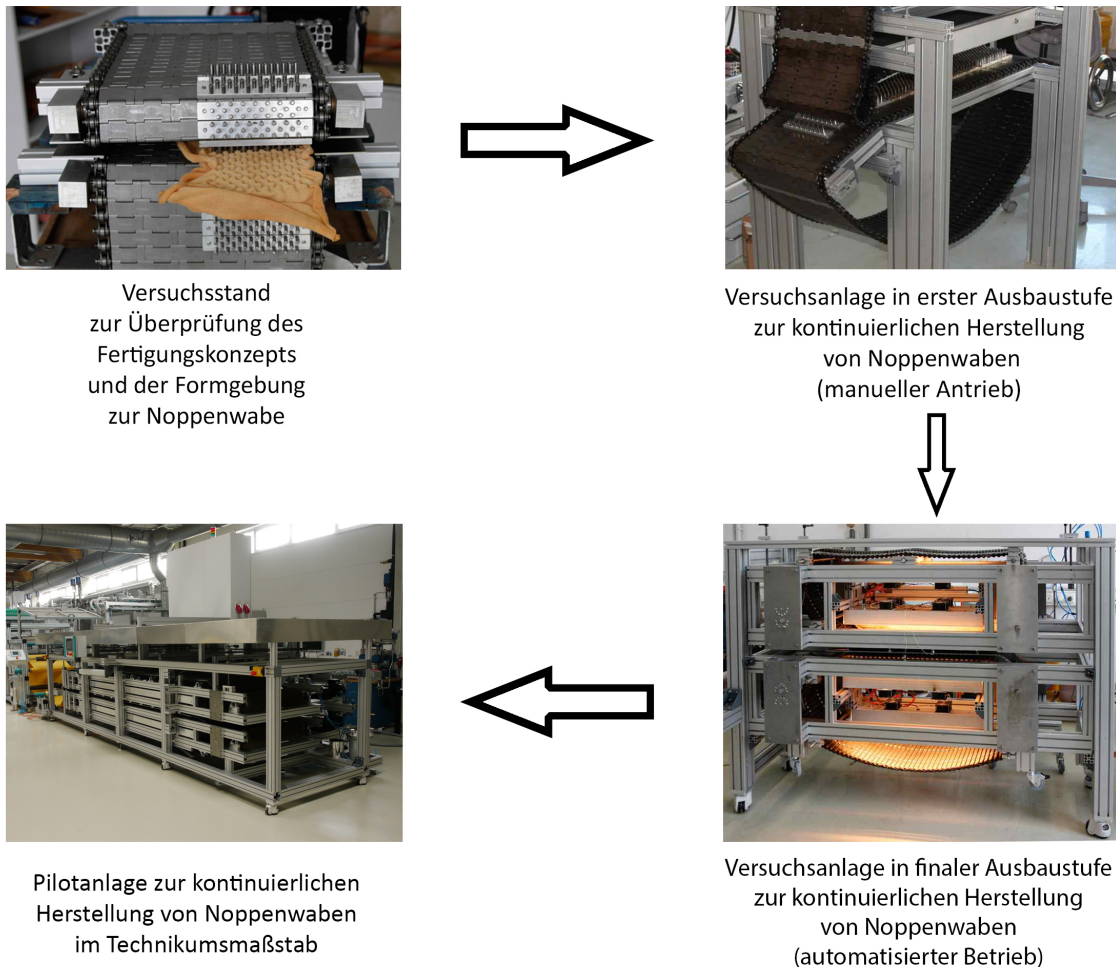


Abb. 6.11: Verschiedene Entwicklungsstufen der Anlagen zur kontinuierlichen Herstellung von Noppenwaben

Für jede Entwicklungsstufe existierten dabei unterschiedliche Zielvorgaben. So lag der Fokus beim Aufbau der Versuchsanlage auf der Validierung des Fertigungskonzeptes sowie auf einer möglichst großen Flexibilität der Anlage hinsichtlich der Produktion verschiedener Noppenvarianten. Die Versuchsanlage ist in Abbildung 6.12 schematisch dargestellt und gibt einen groben Überblick über den Prozess der Noppenwabenherstellung, welcher im Folgenden detaillierter beschrieben wird. Das imprägnierte Textil wird links in die Anlage eingezogen und im Bereich der formgebenden Strecke zur Noppenwabe geformt. Während das Prepreg die formgebende Strecke durchläuft, härtet die Harzmatrix unter Temperaturzufuhr aus. Eine ausführliche Betrachtung der Prozesskette erfolgt in Abbildung 6.14.

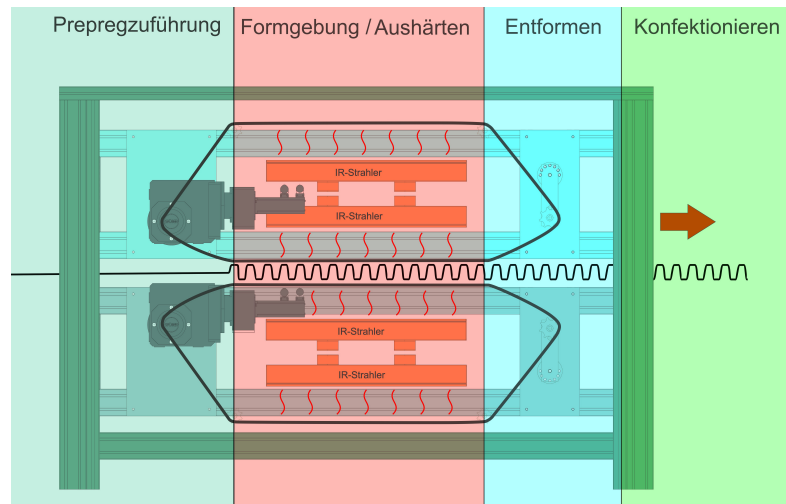


Abb. 6.12: Schematische Darstellung der Versuchsanlage zur kontinuierlichen Herstellung von Noppenwaben

Die Versuchsanlage verfügt über eine formgebende Strecke mit ca. 800 mm Länge und einer Fertigungsbreite von 120 mm. Die maximale Anlagengeschwindigkeit liegt bei 1,17 m/min. Nachdem die Funktionalität des Fertigungskonzepts im kleinen Maßstab nachgewiesen werden konnte, wurde eine größere Pilotanlage mit dem Ziel entwickelt, die Fertigungskapazität deutlich zu erhöhen und durch die Anbindung an eine bestehende horizontale Imprägnieranlage eine komplette Fertigungslinie von der Imprägnierung der Ausgangsmaterialien bis zur Entnahme des formstabilen Kernmaterials zu realisieren. Diese größere Pilotanlage (s. Abbildung 6.13) mit einer Anlagengeschwindigkeit von max. 10 m/min, besitzt eine Fertigungsbreite von 800 mm und eine formgebende Strecke von 3000 mm Länge. In die Entwicklung der Pilotanlage flossen sämtliche Erkenntnisse aus dem Bau der kleineren Versuchsanlage ein.



Abb. 6.13: Im Rahmen der Arbeit aufgebaute Pilotanlage zur kontinuierlichen Herstellung symmetrischer Noppenwaben als Kernmaterial

Für die kontinuierliche Fertigung von Noppenwaben sind mehrere Prozessschritte auszuführen, die in Abbildung 6.14 dargestellt sind. Der erste Schritt der Textilimprägnierung wird an einer bereits vorhandenen horizontalen Imprägnieranlage durchgeführt und aus diesem Grund im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter thematisiert. Die Pilotanlage zur Herstellung der Noppenwaben kann als zusätzliches Modul an die Imprägnieranlage angebunden werden und ermöglicht so die Realisierung einer Prozesskette, die von der Imprägnierung des Textils bis zur Weiterverarbeitung zum einsatzfähigen Kernmaterial alle Schritte abdeckt.

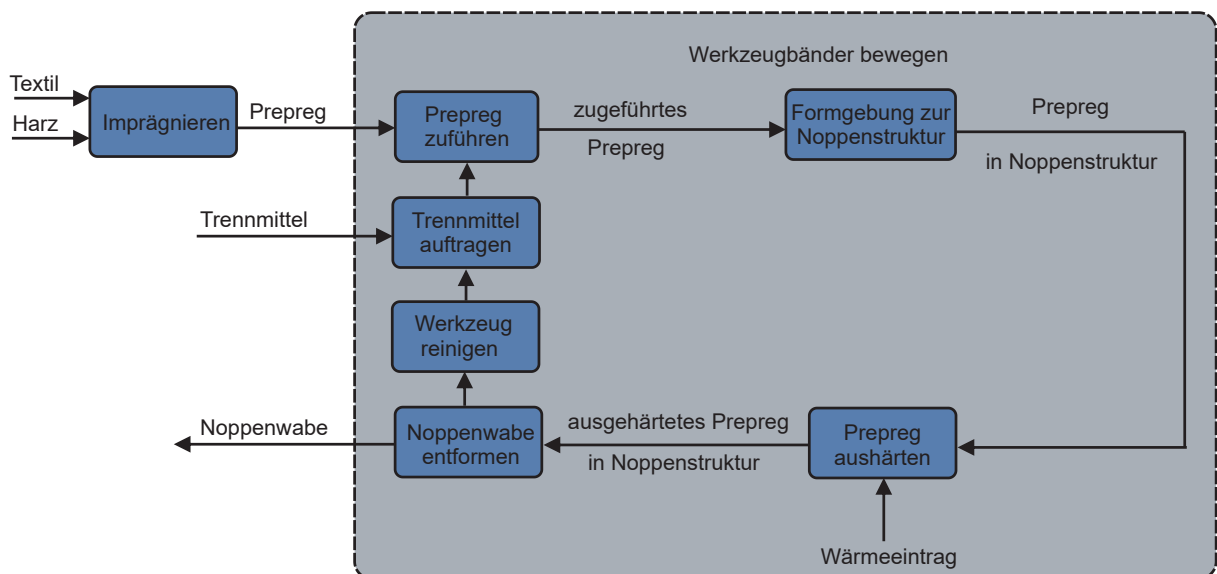


Abb. 6.14: Prozessschritte zur kontinuierlichen Herstellung von Noppenwaben

Die Untergliederung des Kapitels 6.3 orientiert sich an den Teilprozessen, die in den blau eingefärbten Rechtecken dargestellt sind und im Folgenden separat und detailliert betrachtet werden. Der Auftrag eines Trennfilms auf die Werkzeuge muss vor dem ersten Kontakt mit dem imprägnierten Textil sichergestellt werden, damit die problemlose Entformung der Noppenwabe gewährleistet ist. Aus diesem Grund beginnt die Betrachtung der Prozesskette mit dem Schritt „Trennmittel auftragen“.

6.3.1 Auftragen des Trennmittels

Eine problemlose Entformung der Noppenwaben ist von entscheidender Bedeutung, um eine gleichbleibend gute Qualität des Kernmaterials sicherzustellen. Daher muss das Werkzeug vor dem ersten Kontakt mit dem imprägnierten Textil eingetrennt werden, sodass ein Anhaften des Harzes an der Oberfläche vermieden wird. Das Trennmittel wird in diesem Prozessschritt als Sprühnebel auf das heiße Werkzeug aufgebracht. Auf diese Weise kann bei niedrigem Trennmittelverbrauch die sehr große Werkzeugoberfläche vollständig benetzt werden. Die Verwendung der meist lösemittelhaltigen Trennmittel ist aufgrund der Verwendung von Infrarot-Strahlern (IR-Strahler) an der Pilotanlage nicht ungefährlich, da die Strahler eine Oberflächentemperatur von ca. 800°C aufweisen und deshalb eine erhöhte Explosionsgefahr besteht. Es gilt also sicherzustellen, dass das lösemittelhaltige Trennmittel nicht in Kontakt mit heißen ($> 200^{\circ}\text{C}$) Oberflächen kommt oder es muss alternativ ein wasserbasiertes Trennmittel verwendet werden. Das bei der bisherigen Fertigung in der Presse verwendete lösemittelbasierte Trennmittel „Frekote HMT2“ konnte durch ein wasserbasiertes Trennmittel „Frekote Aqualine R220“ ersetzt werden, welches auch im laufenden Betrieb bei eingeschalteten IR-Strahlern verwendet werden kann und gleichwertig gute Ergebnisse liefert. Wie in Abbildung 6.15 zu sehen, wurden bei der Pilotanlage für einen homogenen Auftrag des Trennmittels auf die Werkzeugelemente mehrere Sprühdüsen in gleichmäßigen Abständen über die Breite der Werkzeugbänder

angeordnet. Der Auftrag des Trennmittels kann durch den Druck im Trennmittelbehälter sowie durch die Dauer des Trennmittelauftrags bzw. die Pausen zwischen den Sprühvorgängen eingestellt werden. Die Menge und Häufigkeit des Trennmittelauftrags ist vom verwendeten Harz abhängig und muss durch Versuche ermittelt werden.

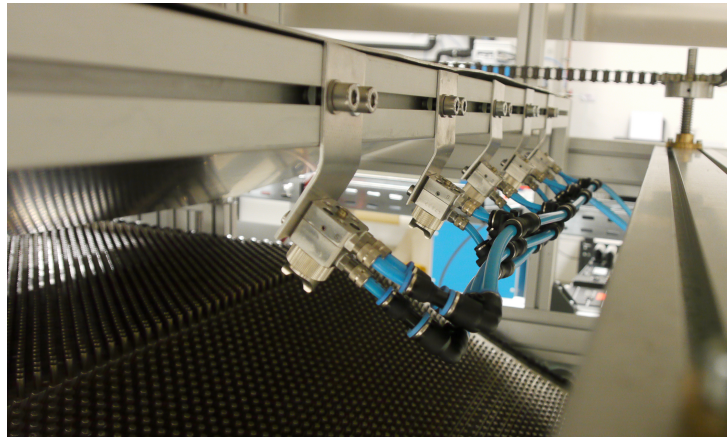


Abb. 6.15: Sprühdüsen zum automatisierten Auftrag des Trennmittels im laufenden Betrieb

6.3.2 Zuführung des Prepregs

Bei der Zuführung des Prepregs ist sicherzustellen, dass das imprägnierte Textil mit definierter Geschwindigkeit zur formgebenden Strecke transportiert wird. Durch die Differenz zwischen Zufuhr- und Verarbeitungsgeschwindigkeit kann die Spannung des Textils variiert werden. Die Textilspannung hat Einfluss auf die automatische Raffung des Textils durch die ineinandergreifenden Werkzeugelemente am Einlauf der formgebenden Strecke. Eine hohe Textilspannung geht bei den verwendeten Maschenwaren stets mit einer ungewollten Verformung der imprägnierten Textilhahn einher. Das Prepreg wird dabei in die Länge gezogen und die Bahnbreite reduziert. Aus diesem Grund muss die Zugbelastung auf die elastische Maschenware möglichst gering sein, da jede durch Spannung hervorgerufene Verformung die weitere gewünschte Verformbarkeit zwischen den Werkzeugelementen und damit die erreichbare Noppenhöhe limitiert. Bei einer spannungsfreien Zuführung kann das Textil die Faltenbildung durch die ineinandergreifenden Werkzeugelemente durch Nachrutschen ausgleichen. Abbildung 6.16 zeigt das Textil im Einlaufbereich der formgebenden Strecke.



Abb. 6.16: Textil rutscht beim Zusammenlaufen der Werkzeugbänder nach und wird gerafft

Mit dem Ziel das Textil gleichmäßig und mit möglichst geringem Verzug zu fördern, wurde die Zuführung an der Versuchsanlage in einem ersten Versuch mit einer angetriebenen Nadelwalze realisiert, wie sie in Abbildung 6.17 dargestellt ist. Diese bringt über die gesamte Textilbreite gleichmäßigen Zug auf und verhindert im Kontaktbereich zwischen Nadelwalze und Textilbahn eine Verringerung der Bahnbreite.

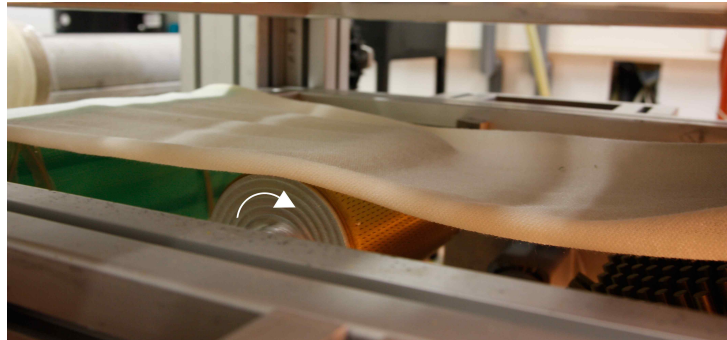


Abb. 6.17: Angetriebene Nadelwalze für die Textileinführung

Die Versuche zeigten jedoch, dass die Verwendung einer Nadelwalze aus verschiedenen Gründen keine optimale Lösung darstellt. Zum einen kann das Textil nicht vollständig an die Einlaufzone herangeführt werden, weil die Walze aufgrund ihrer Größe einen gewissen Abstand zum Werkzeug benötigt, zum anderen wird das imprägnierte Textil bereits bei der Zuführung vor dem ersten Kontakt zur Nadelwalze gespannt und verjüngt sich. So läuft das Textil schon mit reduzierter Bahnbreite auf die Nadelwalze auf und es ist nicht mehr möglich, die ursprüngliche Breite bis zum Einlauf in den formgebenden Bereich wieder herzustellen.

Eine Alternative zur Nadelwalze stellt ein sogenannter Spannrahmen dar, wie er in der Textilindustrie zum Einsatz kommt. Dieser besteht im wesentlichen aus zwei mit Nadeln bestückten Ketten, die an der rechten und linken Seite des Rahmens parallel laufen und zwischen denen das zu verarbeitende Textil gespannt ist. Exemplarisch ist ein solches Kettenelement in Abbildung 6.18 dargestellt.

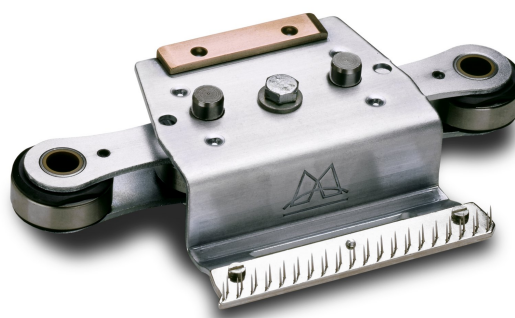


Abb. 6.18: Nadelkette im Spannrahmen zur Textileinführung (Quelle: Monforts Textilmaschinen)

Diese Konstruktion erlaubt, dass das Textil unmittelbar nach dem Abrollen von den Nadelketten aufgenommen werden kann und zu keinem Zeitpunkt ohne Führung gespannt wird. Eine Verringerung der Bahnbreite ist dadurch ausgeschlossen. Die Vorteile dieses Konzeptes kommen vor allem dann zum Tragen, wenn die Nadelketten außerhalb der formgebenden Strecke laufen und so das Textil direkt in den formgebenden Bereich der Anlage geführt werden kann, ohne dass bis dahin eine ungewollte Verformung stattgefunden hat. In diesem Fall ist allerdings die Variabilität bezüglich unterschiedlicher Textilbreiten stark eingeschränkt, da die Textilbreite die Werkzeugbreite übersteigen muss. Insofern bringt die beschriebene Textileinführung mittels Spannrahmen auch Nachteile mit

sich. Für den Einsatz an der Pilotanlage, bei der die Werkzeugbreite in einigen Fällen die Textilbreite überschreitet, ist das beschriebene Konzept ungeeignet.

Als dritte Variante kann das Textil auf einem Trägermaterial liegen, welches die Zugkraft aufnimmt. In diesem Fall wird das zu verarbeitende Textil erst unmittelbar vor dem Einlaufbereich der formgebenden Strecke vom Trägermaterial getrennt. Da bis zu diesem Zeitpunkt keine Zugkraft am Textil anliegt, wird dieses nicht verformt und kann mit der vollen Bahnbreite der formgebenden Strecke zugeführt werden. Durch die vorherige Imprägnierung ist eine Trägerfolie oder ein -papier in den allermeisten Fällen ohnehin vorhanden. Die Voraussetzung des spannungsfreien Textiltransports auf einem Trägermaterial ist aufgrund der Anbindung der Pilotanlage an die vorgeschaltete Imprägnieranlage gegeben. Das beschriebene Konzept ermöglicht die Verwendung verschiedener Textilbreiten, unabhängig von der Werkzeugbreite. Darüber hinaus ist die konstruktive Umsetzung dieser Variante im Vergleich zum Spannrahmen einfacher zu realisieren, weshalb für die Pilotanlage diese Art der Textilzuführung ausgewählt wurde (s. Abbildung 6.19).

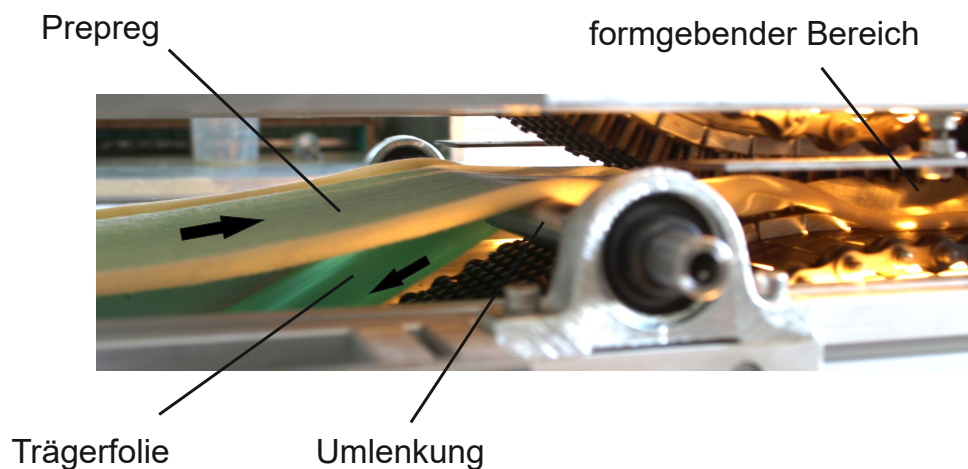


Abb. 6.19: Die Textilzuführung über ein Trägermaterial ermöglicht den Transport des Textils, ohne dieses einer Zugbelastung auszusetzen. (Textilzuführung an der Versuchsanlage)

Durch die Anbindung der Pilotanlage an die Imprägnieranlage kann auf eine angetriebene Textilzuführung an der Pilotanlage verzichtet werden. Stattdessen wird das Trägermaterial, wie in Abbildung 6.19 gezeigt, umgelenkt und an der horizontalen Imprägnieranlage aufgewickelt. Die Geschwindigkeit der Imprägnieranlage wird als Leitgeschwindigkeit an die Pilotanlage zur Noppenherstellung weitergegeben, welche die Geschwindigkeit der Werkzeugbänder an die Zufuhrgeschwindigkeit des Textils anpasst. Trotz einer maximal möglichen Anlagengeschwindigkeit von 10 m/min an der Pilotanlage, lag in den durchgeführten Versuchen die Geschwindigkeit üblicherweise im Bereich zwischen 1 und 2 m/min. Aufgrund der Tatsache, dass das Textil im Einzugsbereich durch das Ineinandergreifen der Werkzeugelemente gerafft wird, muss das Material schneller zugeführt werden, als es durch die formgebende Strecke gefördert wird. Dieser Geschwindigkeitsdifferenz wird dadurch Rechnung getragen, dass die Geschwindigkeit der Werkzeugbänder durch einen Korrekturfaktor zur Leitgeschwindigkeit eingestellt werden kann. Der Korrekturfaktor hängt von der Art des verwendeten Textils und der Noppenhöhe ab. Neben der Eingabe eines Korrekturfaktors lässt sich an der Pilotanlage optional eine Durchhangregelung zuschalten, damit eine gleichbleibende Textilspannung sichergestellt werden kann. Hierbei wird der Durchhang des Textils vor dem Einlauf in die formgebende Strecke mittels eines Infrarot-Sensors gemessen und die Geschwindigkeit der Werkzeugbänder an der Pilotanlage dahingehend angepasst, dass der Durchhang einem vorgegebenen Sollwert entspricht.

6.3.3 Formgebung zur Noppenstruktur

Die Formgebung des Textils findet zwischen zwei Werkzeugbändern statt, wie sie die Firma Kurt Allert GmbH & Co. KG für verschiedene Förderanwendungen anbietet. Hierbei handelt es sich um Scharnierplattenbänder aus Stahlblech, welche in verschiedenen Breiten lieferbar und bei Temperaturen von bis zu 300 K einsetzbar sind, sodass keine Probleme in puncto Chemikalien- oder Temperaturbeständigkeit entstehen. Bei der kleinsten erhältlichen Teilung von 25,4 mm kann das Band um ein Kettenrad mit einem Radius von 35 mm gelenkt werden. Die formgebenden Werkzeugelemente müssen dabei hinsichtlich der Durchmesser der Zylinderstifte und deren Anordnung an die Teilung von 25,4 mm angepasst sein.

Bei der Versuchsanlage kam das beschriebene Scharnierplattenband in einer Breite von 300 mm mit darauf montierten Werkzeugelementen von 120 mm Nutzbreite zum Einsatz und erwies sich als geeignet. Aus diesem Grund wurde für die Pilotanlage ein typgleiches Plattenband mit einer Nutzbreite von 1000 mm verwendet, auf welches formgebende Werkzeugelemente mit einer nutzbaren Breite von 800 mm aufgeschraubt wurden. Der Zusammenlauf der Werkzeugbänder an der Pilotanlage ist in Abbildung 6.20 dargestellt.

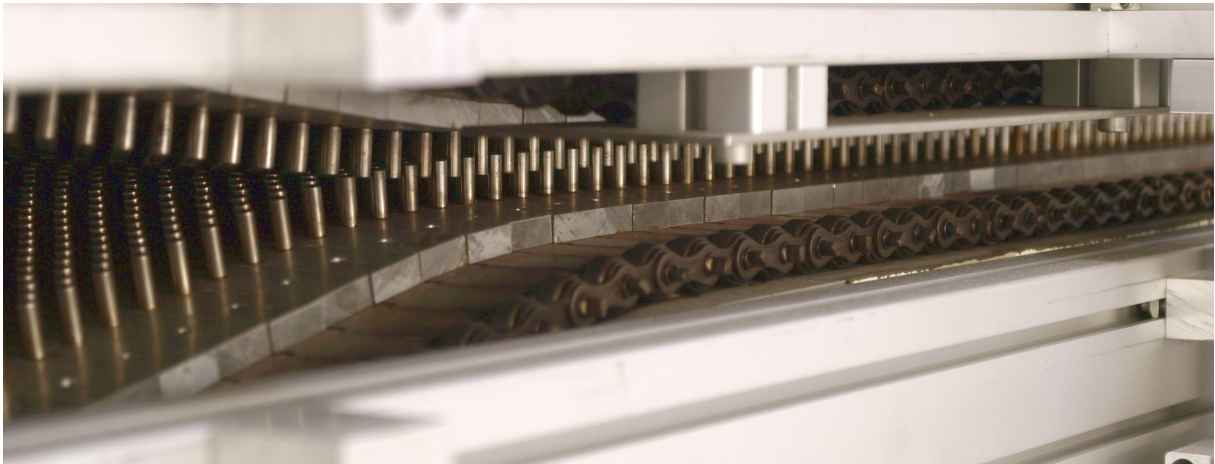


Abb. 6.20: Scharnierplattenband mit aufgeschraubten Werkzeugelementen

Die aufgeschraubten Werkzeugelemente bestehen, wie bereits die Werkzeuge für die diskontinuierliche Fertigung, aus einer Aluminiumplatte mit eingelassenen Zylinderstiften. Diese sind aus hochlegiertem Stahl (100Cr6) gefertigt und kommen üblicherweise in Zylinderrollenlagern zum Einsatz. Aufgrund ihrer weiten Verbreitung können sie günstig zugekauft werden und ermöglichen eine preiswerte Herstellung der Werkzeugelemente. Durch die glatte, gehärtete Oberfläche sind die Zylinderstifte für die Formgebung der Noppen gut geeignet. Bei den Werkzeugelementen der ersten Versuchsanlage wurden die Zylinderstifte zunächst eingepresst, jedoch lösten sich bei hohen Temperaturen einige Stifte aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnung von Stahl und Aluminium aus der Grundplatte. Deshalb wurden die formgebenden Zylinderstifte bei der zweiten Version der Versuchsanlage und der Pilotanlage mit einem bei der Fraunhofer PYCO entwickelten hochtemperaturbeständigen Klebstoff auf Polycyanuratbasis eingeklebt (s. Abbildung 6.21). In die Grundkörper wurden Durchgangsbohrungen eingebracht, um Luft oder Materialeinschlüsse unter den einzuklebenden Stiften zu vermeiden.

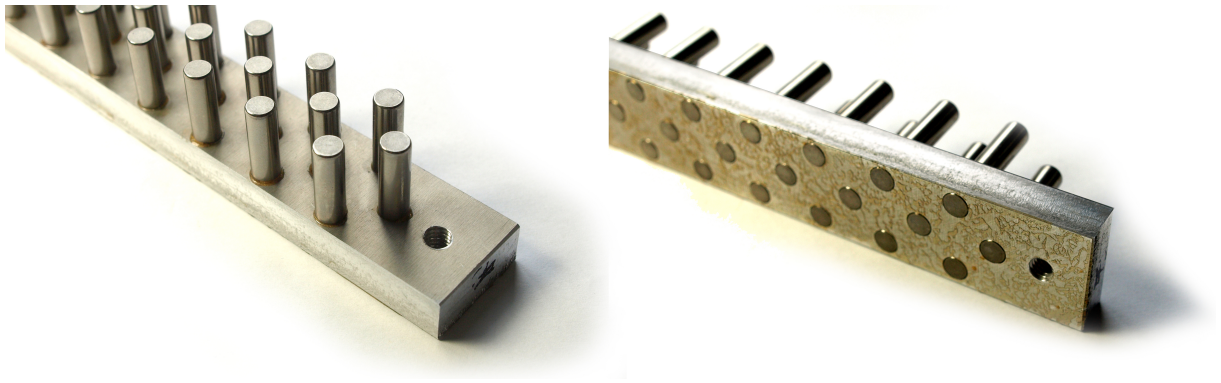


Abb. 6.21: Werkzeugelement, bestehend aus einem Aluminium Grundkörper mit eingeklebten Zylinderstiften aus Stahl (100Cr6)

Neben der Erhöhung der Werkzeugbreite wurde die formgebende Strecke und damit der Bereich des Wärmeeintrags verlängert. Durch die Verlängerung der formgebenden Strecke von 800 mm auf 3000 mm lässt sich die gleiche Aushärtezeit bei einer um den Faktor 3,75 erhöhten Anlagengeschwindigkeit erreichen.

Bei der Versuchsanlage wurde mit den in Abbildung 5.12 (S. 50) zu sehenden Werkzeuggeometrien gearbeitet, um unterschiedliche Varianten der Noppenwabe herzustellen.

Die Versuchsanlage wurde modular aufgebaut und ermöglicht so die Änderung der herzustellenden Geometrie innerhalb kurzer Zeit. Das obere Werkzeugband ist fest in der Anlage installiert und mit Positivwerkzeugen bestückt, während das untere Werkzeugband in ein Modul integriert ist, welches in die Anlage eingeschoben und mit geringem Aufwand gewechselt werden kann. Abbildung 6.22 zeigt die Versuchsanlage mit rot eingefärbtem Wechselmodul.

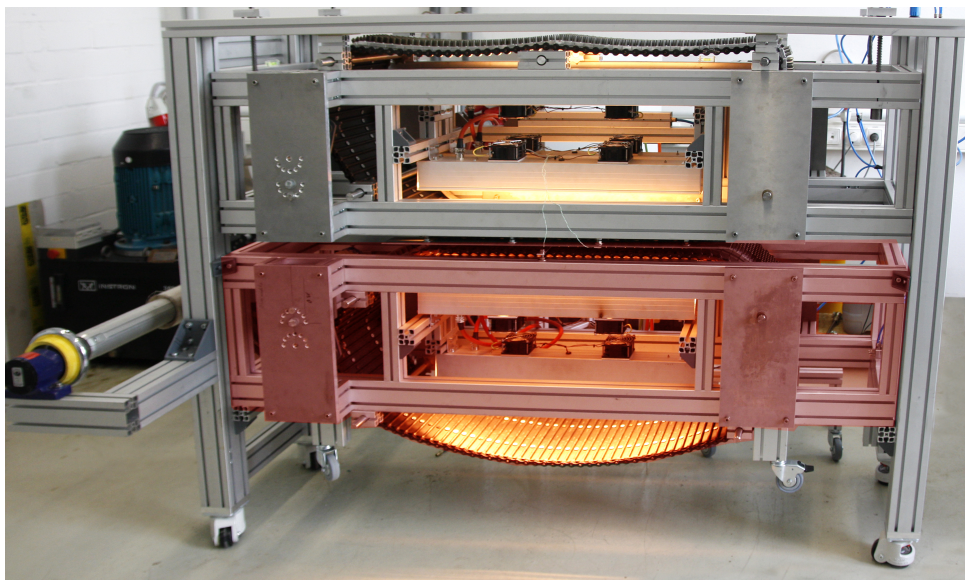


Abb. 6.22: Wechselmodul zur Herstellung unterschiedlicher Noppengeometrien

Zur Herstellung der symmetrischen Noppenwabe wird das Modul mit gleichartigen Positivwerkzeugen verwendet, die versetzt in die Werkzeuge des oberen Bandes eingreifen.

Die Konfiguration mit Positiv- und Negativwerkzeugen zur Herstellung einseitiger Noppenwaben ist in Abbildung 6.23 links zu sehen, die Konfiguration mit zwei Positivwerkzeugen zur Herstellung symmetrischer Noppenwaben ist auf der rechten Seite dargestellt. Über die Höhenverstellung des oberen Bandes kann die Noppenhöhe variiert werden.

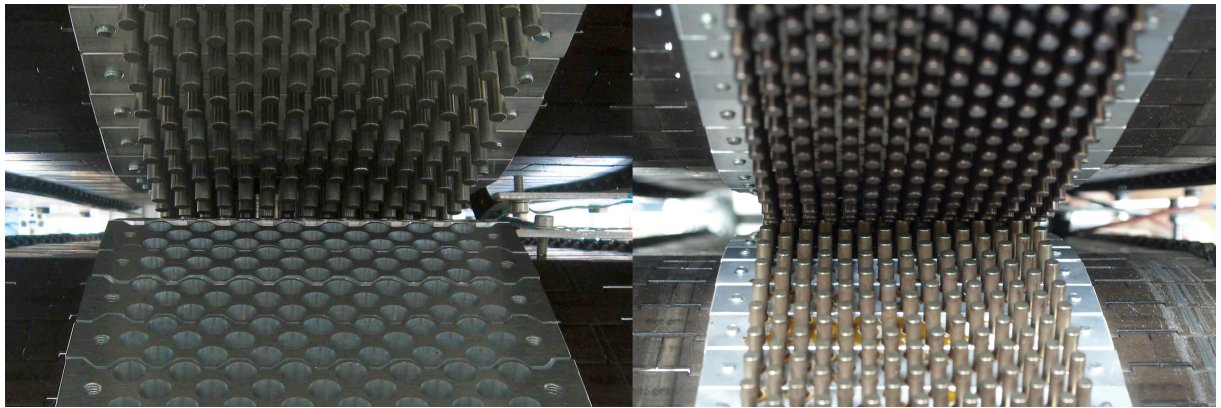


Abb. 6.23: Werkzeugkonfigurationen an der Versuchsanlage:
links: Positiv- und Negativwerkzeug zur Herstellung einseitiger Noppenwaben
rechts: Positiv- und Positivwerkzeug zur Herstellung symmetrischer Noppenwaben

Die Möglichkeit eines wechselbaren Moduls wurde bei der Pilotanlage verworfen, da bereits ein einzelnes Scharnierplattenband inkl. Werkzeugelemente ca. 800 kg wiegt und bei den Abmaßen der Pilotanlage eine deutlich massivere Bauweise der Anlage notwendig ist. Stattdessen müssen an der Pilotanlage zur Fertigung einer anderen Noppengeometrie, eines oder beide Werkzeugbänder gewechselt werden. Hierfür wurde eine Vorrichtung konstruiert, auf welche die Ketten aufgerollt und gelagert werden können (s. Abbildung 6.24).

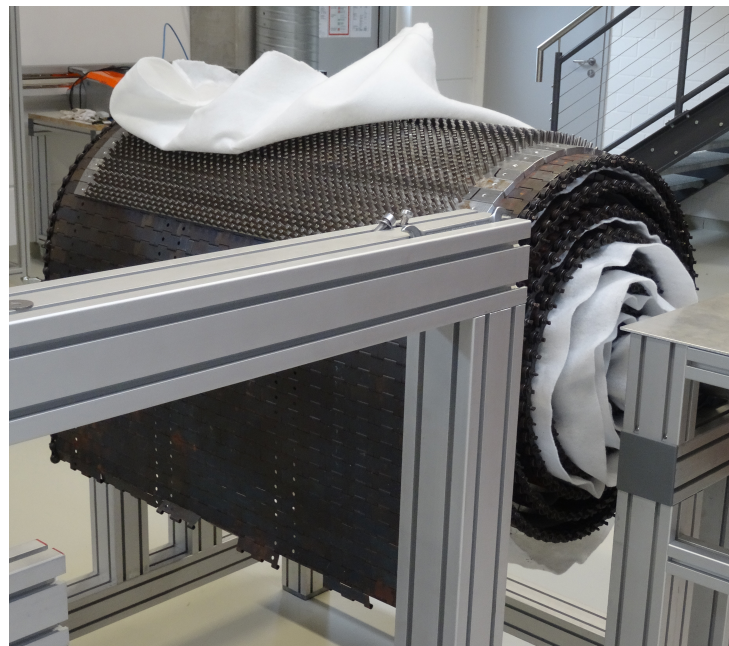


Abb. 6.24: Vorrichtung zur Aufwicklung und Lagerung eines Werkzeugbandes

6.3.4 Aushärtung des Prepregs

Das Aushärten des umgeformten Prepregs geschieht durch Wärmeeintrag in das Material, wodurch das im Textil enthaltene Harz reagiert und härtet. Die Temperierung der Werkzeuge lässt sich auf verschiedene Arten realisieren. Die Presse, welche zur Aufheizung der Werkzeugplatten bei der diskontinuierlichen Fertigung Verwendung findet, wird mit in die Pressplatten eingelassenen Heizpatronen temperiert. Dabei handelt es sich um elektrische Leiter, die von Strom durchflossen werden und sich erwärmen. Die dazu notwendige Verkabelung ist bei einer Presse, bei der sich die Pressplatten nur nach oben oder unten bewegen, ohne größeren Aufwand zu bewerkstelligen. Aufgrund der umlaufenden Werkzeugbänder würde sich die Stromversorgung von Heizpatronen im Fall der kontinuierlichen Fertigung deutlich schwieriger gestalten. So wäre z.B. eine aufwändige und möglicherweise fehleranfällige Lösung mit schleifenden Kontakten erforderlich.

Weitere Möglichkeiten zur Aufheizung der Werkzeuge bzw. des imprägnierten Textils sind die Wärmeeinbringung mittels Mikrowelle, Induktion oder Umluft, jedoch wurden diese Varianten aus verschiedenen, meist kostentechnischen Gründen nicht weiter verfolgt. So müsste bei einer Mikrowellenhärtung der zu temperierende Bereich aufwändig abgeschirmt werden, um aus Arbeitsschutzgründen den Austritt von Mikrowellenstrahlung zu vermeiden. Die Erwärmung mittels Induktion ermöglicht nur einen lokal sehr begrenzten Energieeintrag, weshalb für eine gleichmäßige Temperierung der Werkzeugbänder eine Vielzahl von Spulenpaaren notwendig ist. Die Kosten einer solchen Heizung liegen deutlich über denen der letztendlich ausgewählten Lösung einer Wärmeeinbringung mittels kurzwelliger Infrarot-Strahler (IR-Strahler). Diese lassen sich mit geringem Aufwand fest zwischen den Bändern installieren und bestrahlen so deren Rückseite, wodurch sich die Bänder und die darauf montierten Werkzeugelemente erwärmen. Die Werkzeugelemente stehen in Kontakt zu dem in Form gebrachten Prepreg und geben die Wärme an die spätere Noppenwabe ab. Mit dem Ziel die Strahlung möglichst gut zu absorbieren, wurden die Werkzeugbänder rückseitig schwarz lackiert.

Eine weitere Variante ist die Temperierung mittels Umluft. Diese erfordert jedoch eine isolierende Einhausung, welche eine freie Sicht auf die Werkzeugbänder und das zu verarbeitende Textil behindert. Vorteilhaft und ausschlaggebend für die Wahl einer Temperierung mittels IR-Strahler ist der mögliche Verzicht auf eine solche Einhausung. Da bei der Pilotanlage mit verschiedenen Materialien und Geometrien gearbeitet werden soll und der direkte Blick auf das verarbeitete Textil notwendig ist, wurde von einer isolierenden Einhausung und einer Temperierung mittels Umluft Abstand genommen. Für eine im Dauerbetrieb genutzte Produktionsanlage mit gleichbleibenden Prozessparametern, bei der in erster Linie die laufenden Kosten entscheidend sind, wäre die Temperierung mittels Umluft aufgrund der niedrigeren Betriebskosten gut geeignet.

In der Versuchsanlage kommen pro Band drei Strahler mit einer Leistung von je 3 kW zum Einsatz. Die größere Pilotanlage ist mit 12 Strahlern mit einer Heizleistung von je 6 kW bestückt. Außerdem wurde der Aufbau im Vergleich zur Versuchsanlage dahingehend optimiert, dass die Strahler alle in einer Ebene liegen und quer zur Laufrichtung der Werkzeugbänder ausgerichtet sind. Der Bereich der Heizwendel deckt dabei die Breite des Scharnierplattenbandes ab, sodass ein gleichmäßiger Wärmeeintrag über die gesamte Breite des Werkzeugbandes stattfindet. Auch werden Strahler ohne Reflektor eingesetzt, sodass die Abstrahlung in alle Richtungen identisch ist. Auf diese Weise wird das Werkzeugband im Rücklauf mit der gleichen Intensität bestrahlt wie im Bereich der formgebenden Strecke (s. Abbildung 6.25).

Die Temperaturregelung erfolgt sowohl bei der Versuchs- als auch bei der Pilotanlage in Form von PID-Reglern (Regler mit proportionalem, integralem und differentialem Verhalten) über die Anlagensteuerung mittels SPS (Speicherprogrammierte Steuerung). Die Temperatur der Zylinderstifte lässt



Abb. 6.25: IR-Strahler zur Temperierung der formgebenden Strecke an der Pilotanlage

sich im laufenden Betrieb nicht ohne weiteres messen, da sie einerseits durch das Prepreg verdeckt und andererseits aufgrund der ineinandergreifenden Werkzeugelemente schwer zugänglich sind. Aus diesem Grund wurden schleifende Temperatursensoren am Rand des Scharnierplattenbandes angebracht, deren Messwerte als Eingangsgröße für die Temperaturregelung verwendet werden. Da die Temperaturerfassung an den Scharnierplattenbändern deutlich dynamischer ist als die Temperaturänderungen an den Zylinderstiften, entsprechen die gemessenen Temperaturen nur in Ausnahmefällen der Voreinstellung. Das direkt bestrahlte Scharnierplattenband erreicht die Soll-Temperatur schneller als die Werkzeugelemente. Diese müssen erst die Wärme des Scharnierplattenbandes aufnehmen, weshalb deren Temperatur langsamer steigt. Da die Wärme des Scharnierplattenbandes sowohl an die darauf montierten Werkzeugelemente, als auch an die Umgebung abgegeben wird, muss das Scharnierplattenband permanent nachgeheizt werden. Der kontinuierliche Wärmeeintrag führt sowohl bei der Versuchs- als auch bei der Pilotanlage zu Temperaturen an den Werkzeugstiften, die deutlich oberhalb der Soll-Temperatur liegen. Bei der Herstellung der Probekörper mit der Versuchsanlage pendelte sich bei einer vorgegebenen Temperatur von 150°C die Temperatur der Zylinderstifte bei ca. $180^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ein.

Die Pilotanlage verfügt zusätzlich zu den schleifenden Temperatursensoren über zwei, im Einlaufbereich der formgebenden Strecke installierte, Pyrometer, welche in der Lage sind, die Werkzeugtemperatur kontaktlos zu messen.

6.3.5 Antrieb der Werkzeugbänder

Zur Ausführung sämtlicher, in Abbildung 6.14 dargestellten, Prozessschritte in einem kontinuierlichen Verfahren, müssen die formgebenden Werkzeugbänder im Umlauf bewegt werden, sodass das Prepreg ohne Unterbrechung befördert und zur Noppenwabe geformt werden kann.

Die Werkzeugbänder der Pilotanlage werden von zwei Getriebemotoren angetrieben, die eine maximale Anlagengeschwindigkeit von 10 m/min erlauben. Um die Motoren den Anforderungen entsprechend auszuwählen sowie die Lagerung der Werkzeugbänder ausreichend zu dimensionieren, wurden die Kettenkräfte und die notwendigen Antriebsdrehmomente nach einem Leitfaden von Jungbluth-Ketten „Die technische Auslegung der Förderkette“ [72] errechnet. Für die Auswahl der Lager wurde der Wälzlager-Katalog der Schäffler-Gruppe herangezogen, der unter anderem Hinweise zur Berechnung der Lagerlebensdauer gibt [73]. Die Berechnungen der Motor- und Kettenkräfte sowie die Lagerauslegung finden sich im Anhang A.3 und A.4.

6.3.6 Entformung der Noppenwabe

Bei der Entformung der Noppenwabe ist zu beachten, dass die Temperatur des formstabil gehärteten Kernmaterials am Ende der formgebenden Strecke noch nahe der Werkzeugtemperatur und damit, je nach verwendetem Harzsystem und Härungsgrad, oberhalb der Erweichungstemperatur liegt. Eine hohe Zugbelastung auf die noch weiche Noppenwabe führt in diesem Fall zu einer Deformation der Noppen und zu einer irreversiblen Schädigung des Kernmaterials. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass die Noppenwabe synchron zur Produktionsgeschwindigkeit entformt wird. Bei ausreichender Trennwirkung der Werkzeuge zeigten die Versuche, dass sich das genoppte Kernmaterial am Ende der formgebenden Strecke selbstständig von den Werkzeugbändern trennt und aus der Anlage herausgeschoben wird. Mit fortschreitender Abkühlung der Noppenwabe wird die Struktur fester und belastbarer.

Ein Anhaften der Struktur an einem der beiden Werkzeugbänder führt zu einem ungleichmäßigen Ergebnis, da die noch verformbare Noppenwabe mit dem Band abknickt und dieser Knick nach Abkühlen des Materials im Kernmaterial verbleibt. Bereits ein partielles Anhaften der Noppenstruktur auf einem Werkzeugband führt zu einer ungleichmäßigen Struktur im Kernmaterial.

6.3.7 Reinigung der Werkzeuge

Die Werkzeuge müssen in regelmäßigen Abständen gereinigt und mit einem neuen Trennfilm versehen werden, um die für eine problemlose Entformung notwendige, ausreichende Trennwirkung an den Werkzeugen zu erreichen. Trotz eines regelmäßigen Trennmittelauftrags bleiben in der Regel Harzreste an den Werkzeugelementen haften, welche die Entformung des Noppenmaterials erschweren. Zum Zweck der Reinigung der formgebenden Werkzeuge wurde an jedem Werkzeugband eine Messingbürste installiert, welche die Harzreste von der Werkzeugoberfläche abträgt (s. Abbildung 6.26).

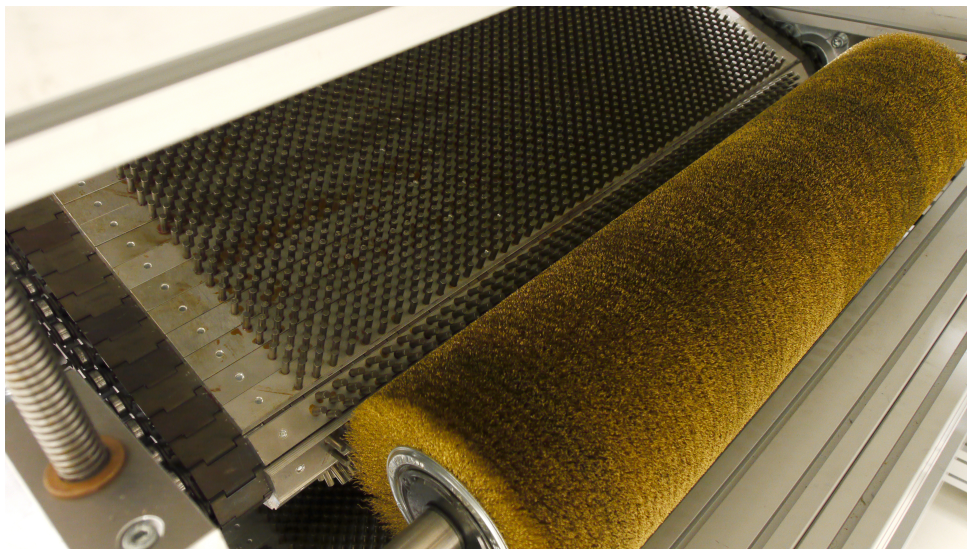


Abb. 6.26: Messingbürste zur Reinigung der formgebenden Werkzeugelemente

Die Bürstenwalzen lassen sich zur Reinigung der Zylinderstifte mit den Werkzeugelementen in Kontakt bringen und können dann in oder gegen die Laufrichtung des Werkzeugbandes rotieren. Da die mechanische Reinigung der Werkzeugoberflächen auch den Trennmittelfilm schädigt, sind die Bürsten unmittelbar vor den Sprühdüsen installiert, um den Trennmittelfilm direkt nach der Reinigung zu erneuern (s. Abschnitt 6.3.1).

6.3.8 Konfektionieren der Noppenwabe

Die fertige Noppenwabe lässt sich nach der Entformung entweder im ebenen Zustand weiterfördern und zu Platten konfektionieren oder aufrollen. In der Anlagensteuerung ist ein Relais zur Steuerung eines Messerbalkens vorgesehen, welcher die Noppenbahn in vorgegebene Längsabschnitte teilt, um das Noppenmaterial zu Platten zu konfektionieren. Alternativ kann das Noppenmaterial als Endlosware aufgerollt werden.

6.4 Kostenbetrachtung der kontinuierlichen Herstellung von Noppenwaben

Das automatisierte und kontinuierliche Verfahren lässt eine deutlich wirtschaftlichere Fertigung von Noppenwaben zu als dies mit dem diskontinuierlichen Verfahren der Fall ist. Im Folgenden sollen exemplarisch die Kosten zur Herstellung symmetrischer Noppenwaben kalkuliert werden. Bei der Kalkulation ist zu beachten, dass diese sich auf eine Fertigung mit der im Rahmen dieser Arbeit aufgebauten Pilotanlage bezieht. Diese wurde zur Herstellung größerer Mustermengen entwickelt und zeigt mit der Anbindung an die horizontale Imprägnieranlage die Integrierbarkeit in eine bestehende Fertigungslinie. Für einen Dauereinsatz im Schichtbetrieb zur Produktion großer Mengen an Kernmaterial ist die Anlage nicht konzipiert. Dementsprechend orientieren sich die veranschlagten Materialkosten an den von der Fraunhofer PYCO bezahlten Preisen für vergleichsweise geringe Materialmengen. Bei der Verarbeitung größerer Mengen kann aufgrund von Mengenrabatt von niedrigeren Einkaufs- und damit Produktionspreisen ausgegangen werden.

In die Kalkulation gehen keine Verschleiß- oder Abschreibungskosten ein, da sich die vorhandene Fertigungslinie von einer Produktionsanlage deutlich unterscheidet.

Folgende Positionen werden in Kostenbetrachtung der kontinuierlichen Herstellung von Noppenwaben berücksichtigt:

- Textilkosten
- Kosten für Harz und Lösemittel
- Trennmittel
- Energiekosten
- Lohnkosten
- Gemeinkosten

Die Betrachtung bezieht sich auf die Herstellung von leichten Noppenwaben mit Phenolharzmatrix, einem Raumgewicht von ca. 30 kg/m^3 und einer Noppenhöhe von 5 mm.

Ausgehend von einer Anlagengeschwindigkeit von 1 m/min und der an der Pilotanlage bestehenden Werkzeugbreite von 0,8 m, lassen sich 48 m^2 Noppenwaben pro Stunde herstellen. Das Textil wird in der betrachteten Konfiguration im Einzug in etwa um den Faktor 1,2 gerafft, sodass für diese Fläche knapp 58 m^2 des Textils benötigt werden. Bei dem für diese Kalkulation herangezogenen Textil (Riedel M212) mit einem Flächengewicht von 90 g/m^2 entspricht dies einem Preis von ca. 183 €. Hierzu addieren sich Kosten für Harz und Lösemittel in Höhe von etwa 36 € (Harz Eponol 0639V C2 (4 €/kg) in Kombination mit Ethanol (3 €/kg)). Die erfolgreiche Entformung erfordert einen regelmäßigen Trennmittelauftrag von ca. zwei Litern pro 50 m^2 hergestellter Noppenwabe. Bei einem Preis von 30 €/l entstehen dadurch Kosten von 60 €.

Neben den Materialkosten fallen darüber hinaus Energie-, Lohn- und Gemeinkosten an. Für den

parallelen Betrieb von Imprägnier- und Pilotanlage wird von einem Stromverbrauch von 160 kW/h ausgegangen. Entsprechend einem Strompreis von vier Cent/kWh ergeben sich Stromkosten in Höhe von 6,4 €/Std. Dieser Kalkulation liegt dabei die Beheizung der Werkzeugbänder mittels IR-Strahlern zu Grunde. Eine Umluftheizung in Kombination mit einer thermischen Isolierung, wie sie im Bereich der Trockenstrecke an der Imprägnieranlage verwendet wird, weist einen höheren Wirkungsgrad auf und könnte dadurch die Energiekosten im laufenden Betrieb reduzieren.

Die Gemeinkosten, welche Miete, Verwaltung und weitere allgemeine Ausgaben enthalten, gehen zur Vereinfachung in den Stundensatz der Mitarbeiter ein und sind somit in der vorliegenden Rechnung in den Lohnkosten enthalten. Während aktuell noch mehr als zwei Mitarbeiter für den parallelen Betrieb der Imprägnier- und Pilotanlage notwendig sind, wird für eine industrielle Fertigung mit gleichbleibender Anlagenkonfiguration im Dauerbetrieb mit zwei Mitarbeitern und Lohnkosten in Höhe von ca. 126 €/Std kalkuliert [74].

Basierend auf der beschriebenen Kalkulation ergeben sich für die Herstellung leichter Noppenwaben mit einer Höhe von ca. 5 mm und einem Raumgewicht von ca. 30 kg/m³ Kosten in Höhe von ca. 415 €/Stunde, bei einer Produktionsleistung von 48 m². Dies entspricht 8,56 €/m². Für schwerere Noppen mit einem Raumgewicht von ca. 60 kg/m³ liegen die Herstellungskosten bei ca. 10,50 €/m². Die prozentualen Anteile der Kosten sind in Abbildung 6.27 dargestellt.

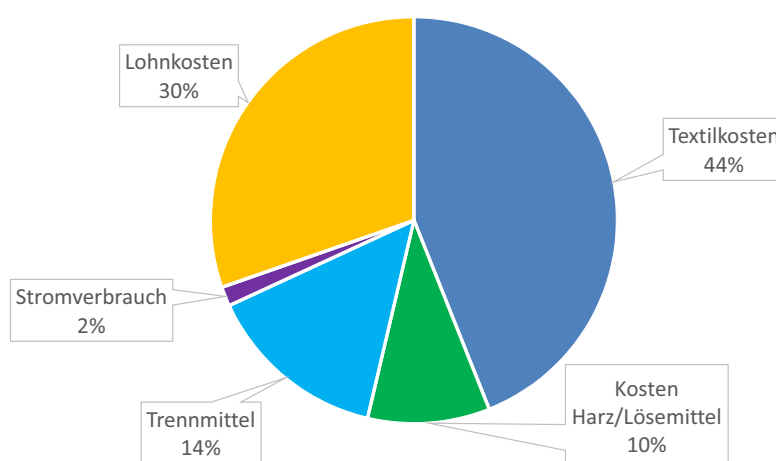


Abb. 6.27: Zusammensetzung der Kosten zur Herstellung brandfester Noppenwaben (Textil 1, Harz Ph1, Noppenhöhe 5 mm, Anlagengeschwindigkeit von 1 m/min)

Die Grafik zeigt anschaulich, dass die Materialkosten bestehend aus Harz, Lösemittel, Textil und Trennmittel ca. 70 % der Gesamtkosten verursachen. Durch höhere Anlagengeschwindigkeiten oder größerer Werkzeugbreite lässt sich die Produktionsleistung ggf. deutlich steigern. In diesem Fall erhöht sich der Anteil der Materialkosten, wohingegen der Lohnkostenanteil sinkt.

Die in der obenstehenden Kalkulation errechneten Herstellungskosten von 8,56 €/m² und 10,50 €/m² dienen als grober Anhaltspunkt und beschreiben näherungsweise die aktuellen Kosten zur Herstellung von Noppenwaben mit der Pilotanlage. Es ist davon auszugehen, dass die Materialkosten, welche in der obenstehenden Kalkulation 68 % betragen, in einem industriellen Produktionsprozess bei Verarbeitung größerer Mengen und damit einhergehender Staffelpreise deutlich gesenkt werden können. Eine zur Produktion genutzte Fertigungslinie würde über eine längere formgebende Strecke und eine größere Werkzeugbreite verfügen und auf diese Weise eine höhere Fertigungskapazität erzielen. Dies würde wiederum die Lohnkosten pro m² senken. Berücksichtigt man die genannten Aspekte, ist davon auszugehen, dass die Kosten zur industriellen Herstellung textiler Noppenwaben mit dem kontinuierlichen Fertigungsverfahren deutlich unter den Werten der obenstehenden Kalku-

lation liegen können.

Die Produktionskosten für Honeycombs konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht ermittelt werden. Der Verkaufspreis für Nomex® Honeycombs mit einem Raumgewicht von 29 kg/m^3 und einer Kernhöhe von 5 mm liegt jedoch in einem Bereich um 45 €/m^2 , für selbige Honeycomb mit einer Kernhöhe von 10 mm liegt der Preis bei 55 € [\[75\]](#).

7 Charakterisierung kontinuierlich hergestellter Noppenwaben

Mit dem Aufbau der Versuchs- und der Pilotanlage war es möglich, symmetrische Noppenwaben kontinuierlich herzustellen und zu charakterisieren. Die mechanischen Eigenschaften der Noppenwaben spielen für den geplanten Einsatz als Kernmaterial in nichttragenden Verkleidungselementen zwar nur eine untergeordnete Rolle, ein Vergleich mit etablierten Kernmaterialien sowie diskontinuierlich hergestellten, einseitigen Noppenwaben ist dennoch hilfreich, um das Kernmaterial bezüglich seiner Leistungsfähigkeit einzuordnen. Für die Untersuchungen wurden symmetrische Noppenwaben in unterschiedlichen Materialkombinationen auf der Versuchsanlage gefertigt und zu Sandwichplatten weiterverarbeitet. Die daraus hergestellten Probekörper wurden hinsichtlich ihrer Druck-, Schub- und Biegeeigenschaften getestet sowie die Anbindung des Kernmaterials an die Decklagen im Trommelschälversuch analysiert.

Neben den genannten Tests wurde das Impact-Verhalten, das Verhalten des Sandwiches gegenüber schlagartiger Beanspruchung durch einen Fallbolzen, untersucht. Mit Geschwindigkeiten des Fallbolzens zwischen 1,2 m/s und 2,05 m/s spiegelt der Test Belastungen wieder, wie sie beispielsweise durch auf das Panel herabfallenden Gegenstände oder Remppler gegen das Bauteil mit einer Kofferecke oder ähnlichem auftreten können.

Zur Ermittlung der relevanten FST-Eigenschaften wurden Sandwiches mit Noppenwabenkern im Cone-Kalorimeter bezüglich ihres Brandverhaltens analysiert und mit luftfahrtzertifizierten Schäumen sowie Nomex®-Honeycombs verglichen.

7.1 Herstellung von Probekörpern

Für die Herstellung der Probekörper wurden symmetrische Noppenwaben auf der Versuchsanlage in einer Breite von 120 mm als Endlosmaterial hergestellt. Hierbei wurde, unabhängig vom Harzsystem, stets mit einer Temperatur von ca. 180°C an den Zylinderstiften gearbeitet. Deren Temperatur wurde wie in Abbildung 7.1 zu sehen ist, mittels eines berührungslosen IR-Thermometers im Bereich der Entformung erfasst.

Für die Herstellung der Probekörper wurden die Textilien von Hand imprägniert und ein Harzgehalt von ca. 50 % angestrebt. Hierzu wurden die Textilien vor und nach dem Imprägnieren gewogen und der Harzgehalt durch Auswringen oder weitere Harzzugabe so weit korrigiert, bis er möglichst genau dem vorgegebenen Wert von ca. 50 % entsprach. Im Anschluss wurden die harzgetränkten Textilien zunächst aufgehängt, um das Lösemittel verdunsten zu lassen und danach für die weitere Verarbeitung zusammen mit einer Träger- bzw. Trennfolie auf eine Hülse aufgerollt. Die Hülse konnte dann an der Versuchsanlage eingespannt und das imprägnierte Textil über die Trägerfolie, wie in Kapitel 6.3.2 beschrieben, der formgebenden Strecke mit definierter und gleichmäßiger Geschwindigkeit zugeführt werden.



Abb. 7.1: Erfassung der Werkzeugtemperatur im Auslaufbereich mittels IR-Thermometer

Es wurden zwei ausgewählte Textilien verarbeitet, bei denen es sich zum einen um ein Gestrick der Riedel Textil GmbH aus 80% Aramid und 20% Polyester mit einem Flächengewicht von 90 g/m^2 (Textil 1), zum anderen um ein Gewirk von Mattes & Ammann GmbH & Co. KG mit einem Flächengewicht von 165 g/m^2 und identischer Materialzusammensetzung (Textil 2) handelt.

Für den Vergleich wurden die luftfahrtzertifizierten Schäume Airex R82.60 [40], Divinycell F50 [41], Rohacell RIST 51 und 71 [42] sowie die Honeycomb C1 3,2-29 [76], eine Nomex®-Honeycomb mit 3,2 mm Zellweite und einem Raumgewicht von 29 kg/m^3 , herangezogen.

Sämtliche Kernmaterialien wurden mit einlagigen Decklagen eines phenolharzbasierten Prepregs (Isovolta Airpreg PC 8242, Flächengewicht 521 g/m^2) bei 135°C in einer Presse des Herstellers Rucks Maschinenbau GmbH [G6] zu Sandwichplatten verarbeitet. Für diesen Arbeitsschritt wurde das Kernmaterial mit den Decklagen in die kalte Presse eingelegt, die Pressplatten auf einen definierten Abstand zusammengefahren und mit 10 K/min auf 135°C aufgeheizt. Diese Temperatur wurde für 70 min gehalten, bevor die Presse wieder heruntergekühlt und die Sandwichplatten entnommen wurden.

Untersuchte Harzsysteme zur Herstellung von Noppenwaben

Ausgehend vom Referenzharz Ph1 (Eponol 0639 V C2) [77], einem kommerziell erhältlichen luftfahrtzertifizierten Phenolharz von Hexion, wurden mit dem Ziel einer kürzeren Aushärtezeit, verschiedene weitere an der PYCO entwickelte Harze und Harzmodifikationen untersucht, von denen die sieben in Tabelle 7.1 aufgeführten Harze zur kontinuierlichen Herstellung von Noppenwaben verwendet wurden. Neben einer kurzen Aushärtezeit wurde auf das Erreichen mindestens gleichwertiger FST- und mechanischer Eigenschaften Wert gelegt.

Unter anderem wurden mit Harz Ph3 und Harz Ph4 zwei Formulierungen mit unterschiedlichem Vernetzungsgrad eines holzölmodifizierten Phenolharzes untersucht. Das Harz wurde im Rahmen des Verbundvorhabens NaKab (Nachhaltige Rohstoffe und effizientere Herstellverfahren für Kabinenanwendungen) (FKZ: 20K1105A) an der Fraunhofer PYCO zur Herstellung luftfahrttauglicher Prepregs entwickelt. Durch die Holzölmodifizierung kann ein Anteil von 20 Ma.-% nachwachsend erzeugter Bestandteile im Harz realisiert werden. Gleichzeitig wurde bei der Entwicklung sichergestellt, dass die mechanischen und brandschutztechnischen Anforderungen für eine spätere Luftfahrtqualifizierung durch die aus dem Harz hergestellten Prepregs erfüllt werden. Neben der Einbringung eines hohen Anteils nachwachsender Rohstoffe hat die Modifizierung mit Holzöl eine flexibilisierende Wirkung, sodass die Sprödigkeit im Vergleich zum unmodifizierten Harz deutlich reduziert werden konnte. Die

Verwendung des beschriebenen Harzsystems zur Herstellung der Noppenwabe erfolgte mit dem Ziel, die Härtingsreaktion zu beschleunigen und somit die Produktionsgeschwindigkeit zu erhöhen. Von allen untersuchten Phenolharzen wurden die Gelzeiten auf einer TC-4 Heizplatte von „Gel Instruments“ [G2] bei einer Temperatur von 150 °C bestimmt (s. Abbildung 7.2).

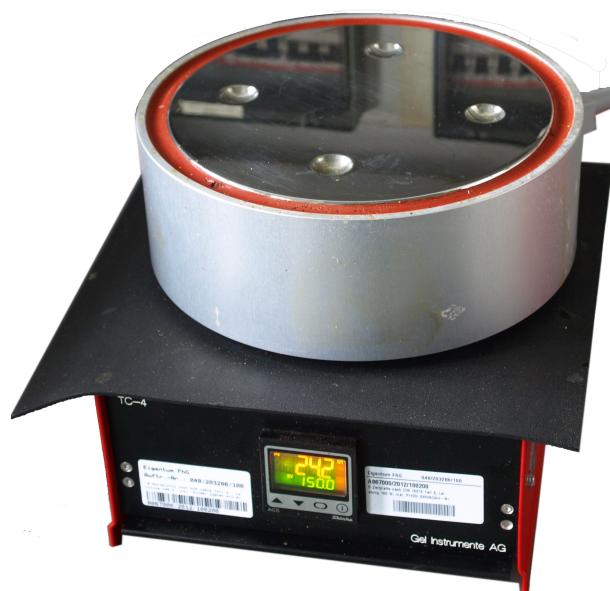


Abb. 7.2: Bestimmung der B-Zeit bei 150°C auf Heizplatte

Die B-Zeit (Zeit bis zum Erreichen des Gelpunkts) ergibt sich aus dem Mittelwert von drei Messungen je Harzsystem.

Tab. 7.1: B-Zeit verschiedener Harze (bei 150°C)

Harz	Harzklasse	B-Zeit (bei 150 °C)
Harz Ph1 (Eponol 0639 V C2)	Phenol	3:45 min
Harz Ph2	Phenol	1:27 min
Harz Ph3	Phenol, holzölmodifiziert	2:26 min
Harz Ph4	Phenol, holzölmodifiziert	2:05 min
Harz Cy1*	Cyanat	1:30 min
Harz Cy2*	Cyanat	3:15 min
Harz EpCy1	Cyanat-Epoxid- Copolymer	nicht bestimmt

* Auf Laborheizplatte bestimmt

Neben den Phenolharzen wurden auch Harzsysteme auf Cyanatbasis zur Herstellung von Noppenwaben verwendet. Cyanatesterharze sind Harzsysteme, die hochvernetzte Polymere bilden. Sie zeichnen sich vor allem durch ihre exzellenten Eigenschaften wie Glasübergangstemperaturen von bis zu 400 °C, hohe Wärmeformbeständigkeiten, hohe mechanische Festigkeiten sowie gute Beständigkeit gegenüber den meisten Chemikalien aus [78, 79]. Eine herausragende Eigenschaft von Cyanaten ist

die Möglichkeit, mittels verschiedener Recycling-Reagenzien das ausgehärtete Polymernetzwerk chemisch wieder aufzuspalten und das daraus hergestellte Bauteil zu recyceln. Die Abbaumechanismen und das Verhalten unterschiedlicher Reagenzien untersuchte D. Söthje in seiner Dissertation mit dem Titel: „Recycling- und reparaturfähige Duromermatrixen für Hochleistungsfaserverbundkunststoffe auf Basis der Polycyanurate“ [80].

Bei Harz Cy1 handelt es sich um ein kommerziell erhältliches Cyanatesterharz (BPCy 708TA) der Firma Qingdao Fundchem Co., Ltd.. Harz Cy2 ist ebenfalls ein Cyanat-Harz, welches jedoch an der Fraunhofer PYCO entwickelt wurde. Ebenfalls an der Fraunhofer PYCO wurde das Harz EpCy1 entwickelt, ein Cyanat-Epoxidharz-Copolymer, welches im Vergleich zu reinen Cyanatharzen mit einem Preis von ca. 8-9 Euro/kg besonders preiswert ist. Die T_g des Reinharzes liegt jedoch mit ca. 120 °C deutlich unterhalb der T_g reiner Cyanatharze.

Die Gelzeit der beiden Cyanatharze (Harz Cy1 und HarzCy2) wurde wie auch bei den Phenolharzen ebenfalls bei 150 °C bestimmt, jedoch mussten diese Messungen auf einer Laborheizplatte durchgeführt werden, sodass die Ergebnisse nicht direkt vergleichbar sind, sondern nur als Orientierung dienen.

Die in Tabelle 7.1 aufgelisteten Harze wurden in Verbindung mit den beiden in Kapitel 7.1 ausgewählten Textilien zur Noppenwabe verarbeitet. Abbildung 7.3 zeigt Noppenwabens, hergestellt mit Textil 1 in Kombination mit verschiedenen Harzsystemen.

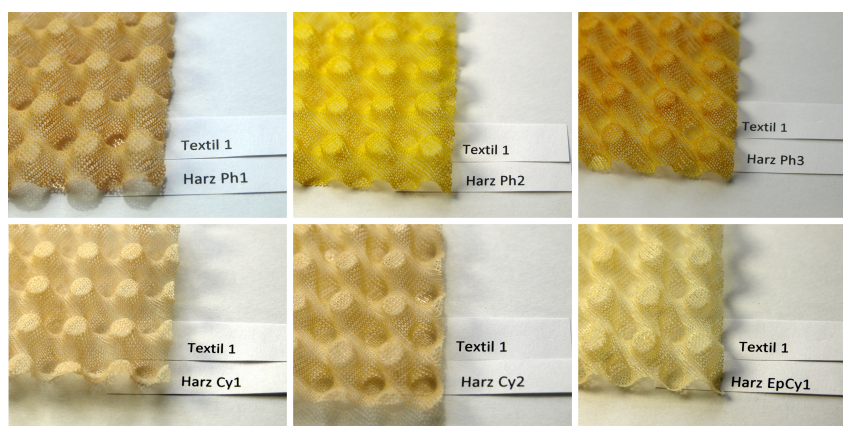


Abb. 7.3: Vergleich von mit Textil 1 hergestellten Noppenwabens

Mit dem Gewirk MA 49743 hergestellte Noppenwabens sind in Abbildung 7.4 dargestellt.

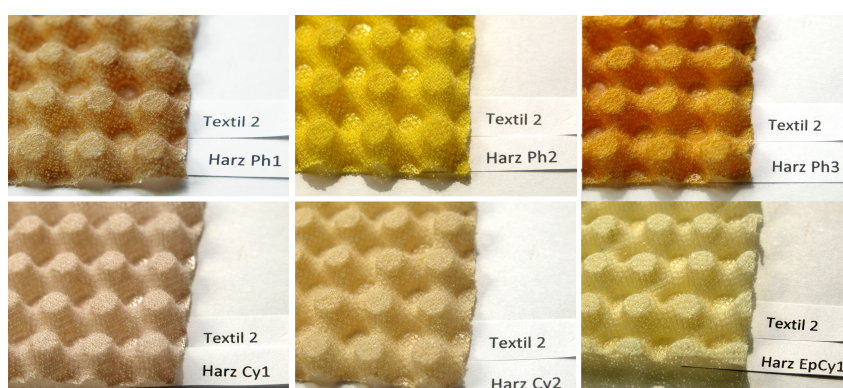


Abb. 7.4: Vergleich von mit Textil 2 hergestellten Noppenwabens

Für die Produktion der Probekörper wurde jeweils ein kurzes Protokoll mit den wesentlichen Anlageneinstellungen erstellt. Exemplarisch ist ein solches Versuchsprotokoll in Tabelle 7.2 dargestellt.

Tab. 7.2: Versuchsprotokoll zur Herstellung symmetrischer Noppenwaben (Texil 1, Harz Ph1)

Harz	Harz Ph1 (Phenol)		
Textil	Textil 1 - ($90\text{g}/\text{m}^2$ - 80% Aramid, 20% Polyester)		
Geschw. Hauptantriebe (v)	0,2 m/min		
Textilzuführung	v + 30 %		
	Soll [°C]	Ist [°C]	IR-Messung an Zylinderstiften
Temperatur Werkzeugband oben	150	146	180 ± 5
Temperatur Werkzeugband unten	150	140	180 ± 5
Bemerkungen	<ul style="list-style-type: none"> - Problemlose Herstellung der Noppenwabe - einfaches Entformen, Noppenwabe ist formstabil aber noch nicht ausgehärtet - Nachhärten im Trockenschrank (135°C - 60 min) - Raumgewicht $28\text{ kg}/\text{m}^3$ - Höhe des Kernmaterials: ca. 9,3 mm 		

In ähnlicher Weise wie die im Versuchsprotokoll in Tabelle 7.2 beschriebene Variante wurden auch alle weiteren, in den Abbildungen 7.3 und 7.4 dargestellten Textil-Harz-Kombinationen zu Untersuchungszwecken verarbeitet. Die zugehörigen Versuchsprotokolle zu den übrigen Materialkombinationen sind im Anhang A.2 aufgeführt.

Mit dem Ziel eine höhere Anlagengeschwindigkeit zu erreichen, wurden sämtliche Noppenwaben nur bis zur Formstabilität in der Versuchsanlage ausgehärtet. Die vollständige Aushärtung erfolgte im Anschluss daran im Trockenschrank. Trotz unterschiedlicher Gelzeiten wurden sämtliche Phenolharze mit 0,2 m/min in der Versuchsanlage verarbeitet.

Die Noppenwaben mit Phenolharzmatrix wurden anschließend 60 min bei einer Temperatur von 135°C im Trockenschrank [G7] nachgehärtet, die Varianten mit Cyanatharz und Cyanat-Epoxidharz-Copolymer für 30 min bei 160°C . Die ausgehärteten Noppenwaben wurden abschließend mit einlagigen Decklagen zu Sandwichplatten verpresst und die zu prüfenden Probekörper aus den Platten ausgeschnitten.

7.2 Mechanische Eigenschaften

Die auf der Versuchsanlage hergestellten Noppenwaben wurden im Hinblick auf Druckfestigkeit, Schubfestigkeit, Biegefestigkeit und der Anbindung an die Decklagen in verschiedenen Tests geprüft. Sämtliche Untersuchungen wurden an einer „Instron 3369“ Prüfmaschine des Herstellers Instron (Instron Corp., Norwood, MA, USA) [G5] durchgeführt.

7.2.1 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit beschreibt die Widerstandsfähigkeit eines Werkstoffes gegenüber einwirkenden Druckkräften und ergibt sich aus der maximalen Druckspannung vor Versagen des Kerns im Druckversuch. Um einen ersten Überblick über die mechanischen Eigenschaften der Noppenwaben, hergestellt mit den in Tabelle 7.1 aufgeführten Harzsystemen, zu erhalten und diese auf einfache Weise gegenüberzustellen, wurden die mit der Versuchsanlage hergestellten Noppenwaben zunächst in einem Drucktest ohne Decklagen untersucht.

Der Verzicht auf Decklagen bietet zwar eine gute Möglichkeit, mit geringem Aufwand die hergestellten Noppenwaben miteinander zu vergleichen, lässt jedoch keine Vergleichbarkeit mit anderen Kernwerkstoffen zu. Aus diesem Grund wurde eine Auswahl der untersuchten Noppenwaben in einem weiteren Test mit Decklagen und in Anlehnung an DIN 53291 [81] geprüft.

Vergleich der Druckfestigkeit symmetrischer Noppenwaben untereinander (ohne Decklagen)

Aus dem ausgehärteten Noppenmaterial wurden Probekörper mit einer Größe von 5×5 Noppen ausgeschnitten und deren Druckeigenschaften untersucht. Dies entspricht bei der verwendeten Werkzeuggeometrie einer Fläche von ca. $60 \times 60 \text{ mm}^2$.

Für den Test wurde die Noppenstruktur zwischen die beiden Druckplatten der Prüfmaschine gelegt und mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min komprimiert. Der Prüfaufbau für den Druckversuch ohne Decklagen ist in Abbildung 7.5 dargestellt.



Abb. 7.5: Prüfaufbau zur vergleichenden Messung der Druckfestigkeit ohne Decklagen

Abbildung 7.6 stellt die Druckfestigkeit der untersuchten Noppenwaben ohne Decklagen über dem

Raumgewicht dar.

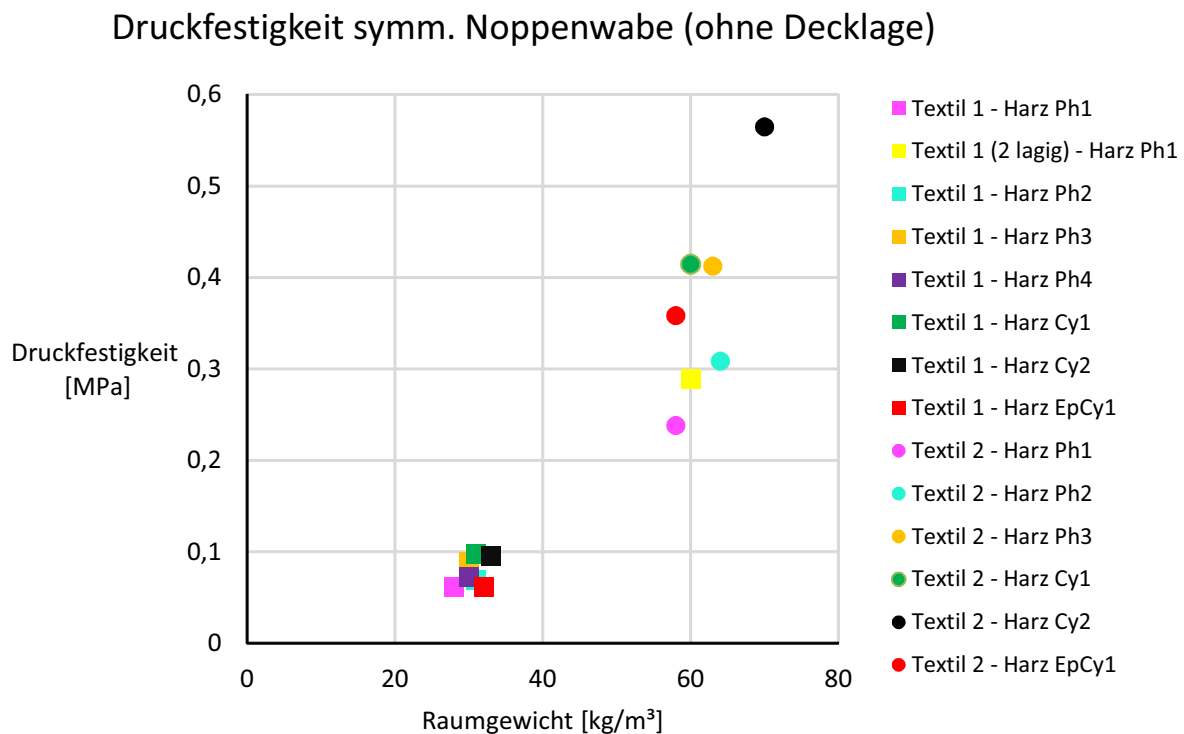


Abb. 7.6: Vergleich der Druckfestigkeit symmetrischer Noppenwaben aus verschiedenen Harz-Textil-Kombinationen in Abhängigkeit vom Raumgewicht (Test ohne Decklagen)

Es ist erkennbar, dass die aus Textil 2 hergestellten Noppenwaben mit ca. 60 kg/m^3 eine mehr als doppelt so hohe Druckfestigkeit aufweisen als die aus Textil 1 hergestellten Waben mit einem Raumgewicht von ca. 30 kg/m^3 . Abbildung 7.6 zeigt, dass die Noppenwaben welche mit Cyanatharz hergestellt wurden, in ihrer Druckfestigkeit den Noppenwaben aus Phenolharz überlegen sind, was auf die besseren mechanischen Eigenschaften der Harzmatrix zurückzuführen ist. Phenolharze bilden bei der Härtung typischerweise ein deutlich ungleichmäßigeres Polymernetzwerk aus als dies bei Cyanaten der Fall ist. Weiterhin begünstigen Polykondensationsprodukte bei Phenolen die Bildung von Lunkern und Fehlstellen in der Harzmatrix, welche dadurch geschwächt wird. Cyanate härten im Gegensatz dazu durch eine Polyaddition, sodass ein wesentlich homogeneres und stabileres Polymernetzwerk gebildet werden kann.

Erwähnenswert ist die Tatsache, dass bei der Untersuchung der Noppenproben teilweise große Schwankungen auftraten. Eine mögliche Ursache dafür sind unterschiedliche Noppenhöhen im Kernmaterial, die durch unzureichende Trennwirkung der formgebenden Werkzeuge oder auftretende Zugbelastung beim Entformen verursacht werden. Dabei wird die Struktur des Kernmaterials deformiert, was zu ungleichmäßigen Noppenhöhen führt. Eine lediglich geringe Varianz oder im Idealfall identische Noppenhöhen sind jedoch für die Herstellung mechanisch belastbarer Bauteile essentiell. Bei Abweichungen der einzelnen Noppenhöhen untereinander werden die Noppen bei der Druckprüfung nicht im Kollektiv beansprucht, sondern nacheinander zerstört. Die höheren Noppen müssen dabei anfänglich die komplette Last tragen und versagen aufgrund der lokal sehr hohen Druckspannung. Bei der weiteren Komprimierung des Sandwichbauteils werden auch die niedrigeren Noppen belastet, erhalten jedoch kaum noch Unterstützung von den bereits zerstörten höheren Noppen.

Zur Illustration der unterschiedlichen Messkurvenverläufe wurden die steilsten und die flachsten Mess-

kurven aus dem Prüflös der Druckproben (NW symm. kont. (Textil 2 - Harz Ph1)) ausgewählt. Diese Proben wurden mit Decklagen geprüft. Ersichtlich wird der beschriebene Verlauf mit der sukzessiven Schädigung der einzelnen Noppen in einer verhältnismäßig flach ansteigenden Messkurve mit weniger ausgeprägtem Maximum, wie er in Abbildung 7.7 bei den Proben 1, 2 und 9 zu sehen ist. Im Gegensatz weisen die Messkurven der Proben 3, 7 und 10 einen deutlich steileren Kraftanstieg sowie einen ausgeprägten Spannungsabfall nach dem gleichzeitigen Versagen der Noppen auf. Es handelt sich bei allen Messkurven um die typgleiche Noppenwabe aus identischen Materialien und vergleichbarem Gewicht und Harzgehalt.

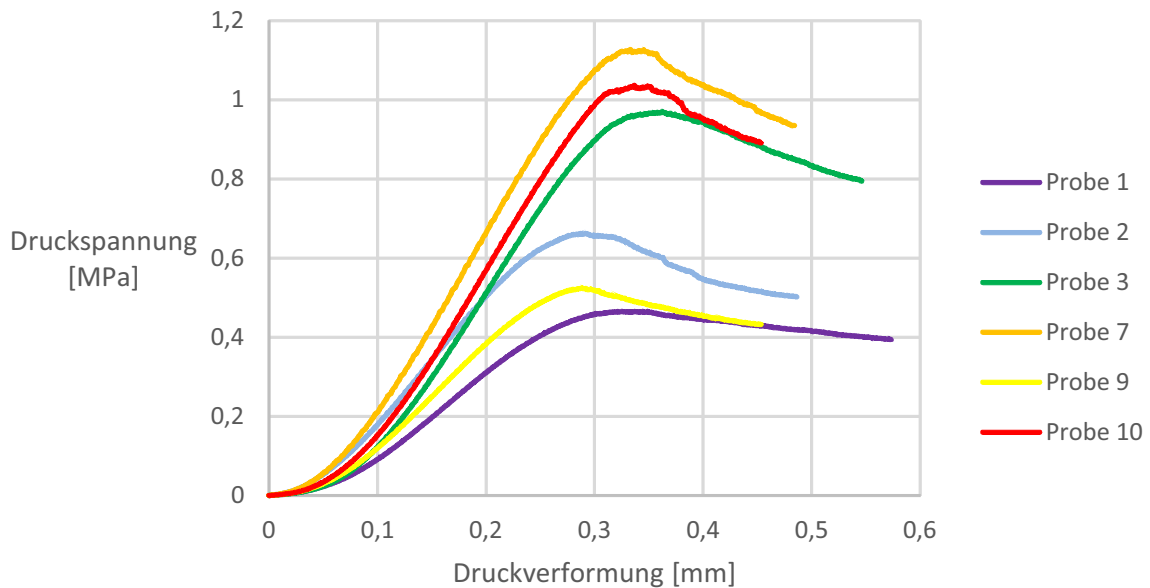


Abb. 7.7: Streuung bei Noppenwaben mit ungleichmäßiger Noppenhöhe (Textil 2 - Harz Ph1), gemessen mit Decklagen (Isovolta Airpreg 8242 1-lagig)

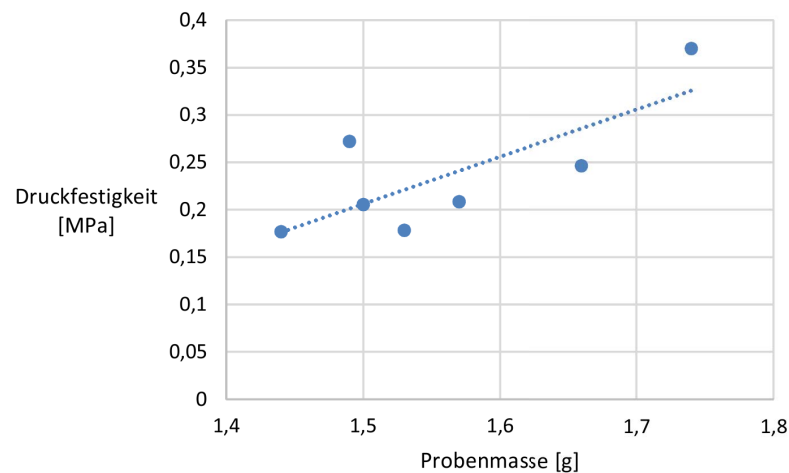
Das obenstehende Diagramm zeigt die Druckspannungsverläufe der jeweils drei Prüfkörper mit den höchsten und den niedrigsten Druckfestigkeiten aus einem Prüflös von 24 Probekörpern. Bei gleichmäßiger Noppenhöhe und einer ungeschädigten Noppenstruktur lassen sich mit der verwendeten Materialkombination reproduzierbar Druckfestigkeiten von ca. 1 MPa erreichen. Bei einer Schädigung des Kernmaterials beim Entformen oder der Herstellung der Sandwichplatten kann jedoch die Druckfestigkeit auch deutlich abfallen. Je nach Ausmaß der Schädigung ist daher auch der Bereich zwischen den dargestellten Spannungsverlaufskurven möglich.

Eine weitere Erklärung für die hohe Schwankungsbreite hinsichtlich der gemessenen Druckfestigkeiten sind fertigungsbedingt unterschiedliche Harzgehalte in den Probekörpern. Da sämtliche Textilien für die Verarbeitung an der Versuchsanlage von Hand imprägniert wurden, ist von einer ungleichmäßigen Harzverteilung im Prepreg auszugehen. Besonders beim Auswringen des Textils entstehen Inhomogenitäten, was eine plausible Erklärung für Schwankungen im Gewicht der Probekörper ist. Exemplarisch sind die Messwerte der kontinuierlich hergestellten (kont.), symmetrischen Noppenwabe ohne Decklagen, mit der Materialkombination „Textil 2 - Harz Ph1“, in Tabelle 7.3 aufgeführt. Die Proben sind dabei aufsteigend nach dem Probengewicht sortiert.

Tab. 7.3: Messwerte: Druckversuch ohne Decklagen - Sym. Noppe kont. Textil 2 - Harz Ph1 (Phenol)

	Nr.	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Gewicht [g]	Max. Druckkraft [N]	Druckfestigkeit [MPa]
2	Probe 2	60	60	7,4	1,44	635	0,17641
5	Probe 5	60	60	7,3	1,49	979	0,27182
3	Probe 3	60	60	7,2	1,50	739	0,20501
6	Probe 6	60	60	7,4	1,53	641	0,17807
7	Probe 7	60	60	7,5	1,57	750	0,20831
4	Probe 4	60	60	7,5	1,66	886	0,24602
1	Probe 1	60	60	7,85	1,74	1367	0,370
	Mittelwert	60	60	7,45	1,56	856	0,23789

Trotz einiger Ausnahmen lässt sich der Trend erkennen, dass die Druckfestigkeit mit dem Raumgewicht korreliert (s. Abbildung 7.8).

**Abb. 7.8:** Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Probenmasse bei symmetrischen Noppenwaben (ohne Decklagen) (Textil 2 - Harz Ph1). Lineare Regressionsgerade als gepunktete Linie dargestellt.

Um Noppenwaben in hoher Qualität herzustellen, ist daher neben einer gleichmäßigen Noppenhöhe des Kernmaterials auch eine homogene Harzverteilung im imprägnierten Textil essentiell.

Druckfestigkeit verschiedener Kernmaterialien im Vergleich

Für weitere Druckprüfungen und den Vergleich mit anderen Kernmaterialien wurden Sandwichproben aus den zu testenden Kernmaterialien und Decklagen je einer Lage Isovolt Airpreg PC 8242 hergestellt und in Anlehnung an DIN 53291 [81] getestet. Eine Übersicht der untersuchten Proben gibt Tabelle 7.4.

Tab. 7.4: Im Druckversuch untersuchte Kernwerkstoffe (nach DIN 53291), gemessen mit Decklage Isovolta Airpreg 8242 1-lagig

Kernmaterial	Raumgewicht Kern [kg/m ³]	Höhe [mm]	Struktur	Noppendurch- messer [mm]	Druckfestigkeit Ø [MPa]	Druckfestigkeit Min / Max [MPa]
Airex R82.60*	60	10	Schaum	—	0,76	0,72 / 0,83 (5 Proben)
Divinycell F 50*	50	10	Schaum	—	0,86	0,82 / 0,95 (5 Proben)
Rohacell®51 RIST*	52	10	Schaum	—	1,06	1,05 / 1,09 (5 Proben)
Rohacell®71 RIST*	75	10	Schaum	—	2,04	2,00 / 2,10 (5 Proben)
Honeycomb C1 3,2-29	29	10	Honeycomb (hexagonal)	—	1,08	0,91 / 1,23 (6 Proben)
Honeycomb C2 3,2-48	48	10	Honeycomb (hexagonal)	—	2,21	2,12 / 2,27 (6 Proben)
NW sym. kont. Textil 1 - Harz Ph1 (Phenol)	28	8,5	Symmetrische Noppenwabe	6	0,13	0,12 / 0,14 (5 Proben)
NW sym. kont. Textil 1 - Harz Cy2 (Cyanat)	31	9,2	Symmetrische Noppenwabe	6	0,17	0,15 / 0,21 (8 Proben)
NW sym. kont. Textil 2 - Harz Ph1 (Phenol)	53	8,2	Symmetrische Noppenwabe	6	0,73	0,46 / 1,12 (24 Proben)
NW sym. kont. Textil 2 - Harz Ph2 (Phenol)	60	7,5	Symmetrische Noppenwabe	6	0,79	0,57 / 1,05 (10 Proben)
NW sym. kont. Textil 2 - Harz Ph3 (Phenol)	53	8,3	Symmetrische Noppenwabe	6	0,51	0,41 / 0,63 (12 Proben)
NW sym. kont. Textil 2 - Harz Cy1 (Cyanat)	60	8,4	Symmetrische Noppenwabe	6	0,54	0,46 / 0,63 (14 Proben)
NW sym. kont. Textil 2 - Harz Cy2 (Cyanat)	54	8	Symmetrische Noppenwabe	6	0,74	0,65 / 0,83 (6 Proben)
NW sym. kont. Textil 2 - Harz EpCy1 (Epoxid-Cyanat)	60	8	Symmetrische Noppenwabe	6	0,74	0,66 / 0,97 (8 Proben)
NW eins. diskont. (Textil 1 - Harz Ph1) (ABe Akustik 01) (Phenol)*	70	10,1	Einseitige Noppenwabe	10	0,61	0,55 / 0,64 (5 Proben)

* Messungen von der InnoMat GmbH durchgeführt

Abbildung 7.9 zeigt die Druckfestigkeit der in Tabelle 7.4 aufgelisteten Kernmaterialien über dem Raumgewicht.

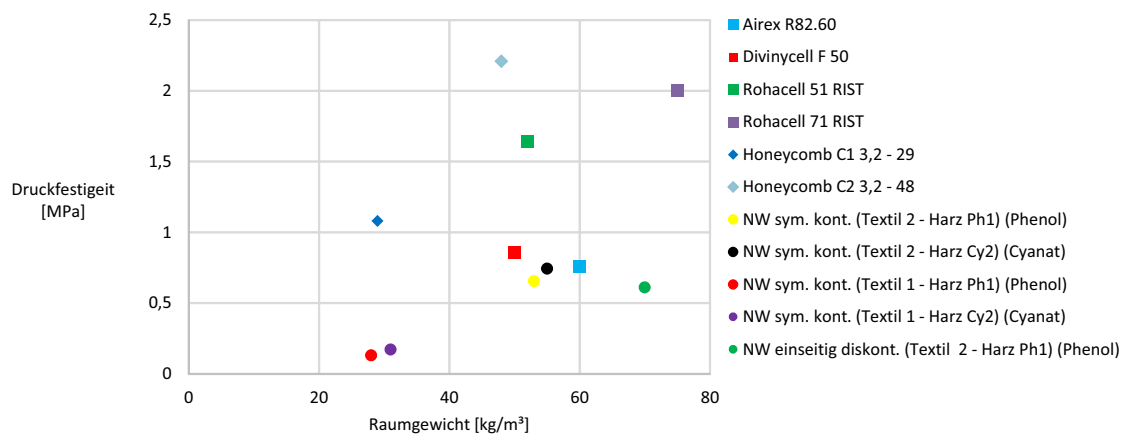


Abb. 7.9: Druckfestigkeit über dem Raumgewicht bei verschiedenen Kernmaterialien, gemessen mit Decklage Isovolta Airpreg 8242 1-lagig

Es ist zu erkennen, dass die verschiedenen Varianten der Noppenwabe bezüglich der spezifischen Druckfestigkeit in etwa auf dem Niveau der Schäume Airex R82.60 und Divinycell F50 liegen. Sowohl die Rohacell®-Schäume als auch Honeycombs weisen deutlich höhere Druckfestigkeiten auf.

7.2.2 Schubfestigkeit

Die Schubfestigkeit beschreibt den Widerstand eines Werkstoffs gegen Abscherung. Zur Untersuchung der Schubeigenschaften wurde eine, von der InnoMat GmbH in Anlehnung an DIN 53294 [82] gefertigte, Prüfvorrichtung eingesetzt (s. Abbildung 7.10).



Abb. 7.10: Prüfvorrichtung zur Untersuchung der Schubfestigkeit. Dargestellt ist ein zwischen den beiden Metallplatten eingeklebter Probekörper, der durch das Verschieben der Platten auf Schub beansprucht wird.

Für die Prüfung wurden die Sandwichproben beidseitig mit den Metallplatten der Prüfvorrichtung verklebt. Zur Verklebung der Sandwichproben mit den Metallplatten wurde ein 2-Komponenten Epoxid-Klebstoff von DELO verwendet (DELO Automix 03 thix, DELO Industrie Klebstoffe GmbH & Co KGaA, Windach, Deutschland), welcher sich unter Temperatureinfluss (100 °C) wieder lösen lässt, um die Werkzeuge erneut verwenden zu können.

Für die Untersuchung der Schubeigenschaften wird der Kern einer Schubbelastung ausgesetzt, indem die beiden Metallplatten gegeneinander verschoben werden. Bei Annahme einer starren Klebeverbindung entspricht die Verschiebung der Platten zueinander dabei der Verformung des Sandwichverbundes und wird von einem an der Prüfvorrichtung installierten Messwegaufnehmer erfasst. Eine Übersicht der auf Schub untersuchten Kernmaterialien sowie deren ermittelte Schubfestigkeit und -steifigkeit findet sich in Tabelle 7.5.

Tab. 7.5: Im Schubversuch untersuchte Kernwerkstoffe, gemessen mit Decklage Isovolt Airpreg 8242 1-lagig

Kernmaterial	Raumgewicht Kern [kg/m ³]	Höhe [mm]	Schubfestigkeit \varnothing [MPa]	Schubfestigkeit Min / Max [MPa]	Schubmodul [MPa]
Airex R82.60*	60	9,35	0,84	0,82 / 0,87 (5 Proben)	16,16
Divinycell F 50*	50	10	0,85	0,82 / 0,87 (5 Proben)	17,64
Rohacell®51 RIST*	52	9,2	0,84	0,83 / 0,85 (5 Proben)	25,12
Rohacell®71 RIST*	75	9,4	1,47	1,41 / 1,53 (5 Proben)	41,69
Honeycomb C1 3,2-29 (l-Richtung)	29	10	0,60	0,58 / 0,62 (5 Proben)	33,55
Honeycomb C1 3,2-29 (w-Richtung)	29	10	0,33	0,28 / 0,36 (5 Proben)	11,29
Honeycomb C2 3,2-48 (l-direction)*	48	10	1,22	1,13 / 1,33 (5 Proben)	46,81
Honeycomb C2 3,2-48 (w-direction)*	48	10	0,63	0,62 / 0,63 (5 Proben)	20,41
NW sym. kont. Textil 1 - Harz Ph1 (Phenol)	28	8	0,10	0,09 / 0,11 (5 Proben)	2,91
NW sym. kont. Textil 1 - Harz Cy2 (Cyanat)	31	8	0,14	0,13 / 0,16 (5 Proben)	4,61
NW sym. kont. Textil 2 - Harz Ph1 (Phenol)	51	8	0,37	0,32 / 0,39 (5 Proben)	12,35
NW sym. kont. Textil 2 - Harz Ph3 (Phenol)	53	8,3	0,36	0,33 / 0,40 (5 Proben)	13,65
NW sym. kont. Textil 2 - Harz Cy1 (Cyanat)	60	8,4	0,09	0,07 / 0,12 (5 Proben)	4,01
NW sym. kont. Textil 2 - Harz Cy2 (Cyanat)	53	8	0,43	0,30 / 0,53 (5 Proben)	11,26
NW sym. kont. Textil 2 - Harz EpCy1 (Epoxid-Cyanat)	60	8	0,49	0,46 / 0,54 (5 Proben)	11,51
NW einseitig. diskont. (Textil 2 - Harz Ph1) (ABe Akustik 01) (Phenol)*	55	10	0,19	0,18 / 0,21 (5 Proben)	7,91

* Messungen von der InnoMat GmbH durchgeführt

Veranschaulichend sind die Schubfestigkeiten über dem Raumgewicht in Abbildung 7.11 im Diagramm dargestellt.

Wie auch bei der Druckbeanspruchung weisen die Honeycombs bei Schubbelastung die höchsten spezifischen Kennwerte auf, jedoch ist hierbei die Vorzugsrichtung der Honeycomb zu beachten. Die l-Richtung, in welche die Klebeflächen der Zellwände orientiert sind (s. Abbildung 4.16 S. 19), ist mit 1,22 MPa fast doppelt so belastbar wie die schwächere w-Richtung mit 0,63 MPa. Die untersuchten Schäume mit einem Raumgewicht zwischen 50 und 75 kg/m³ verhalten sich aufgrund der homogenen Struktur in allen Richtungen gleich und erreichen eine Schubfestigkeit im Bereich von ca. 0,85 MPa.

Die symmetrische Noppenstruktur stellt im Vergleich zur einseitigen Geometrie eine deutliche Verbesserung bei Schubbelastung dar, wenngleich auch diese Variante, wie zu erwarten, nicht die hohen Schubfestigkeiten der Schäume und Honeycombs erreicht. Bei identischem Textil und Harz liegt die Druckfestigkeit der symmetrischen Noppenwabe mit 0,37 MPa (bei gleichzeitig geringerem Raumgewicht) deutlich über der der einseitigen Noppenwabe mit 0,17 MPa.

Eine mögliche Erklärung für die höhere Schubfestigkeit symmetrischer Noppenwaben gegenüber der

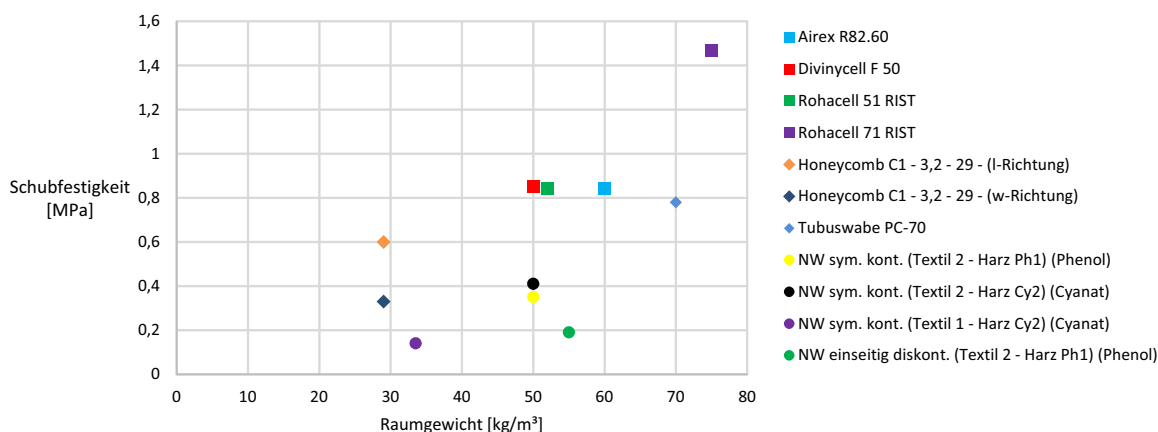


Abb. 7.11: Schubfestigkeit verschiedener Kernmaterialien im Vergleich, gemessen mit Decklage Isovolta Airpreg 8242 1-lagig

einseitigen Geometrie liegt in der Noppenstruktur. Beim Schubversuch werden die untere und obere Ebene des Sandwiches gegeneinander verschoben. Bei einseitigen Noppenwaben ragen die Noppen aus der ebenen Grundfläche heraus, sodass die Noppen auf der gesamten Noppenhöhe ohne weitere Stabilisierung auf Scherung belastet werden. Dies ist in Abbildung 7.12 durch eine blaue Linie dargestellt. Bei der symmetrischen Noppenwabe liegt die Ebene, aus welcher die Noppen herausragen, in der Mitte der Noppenstruktur, sodass die auf Scherung belastete Noppenlänge ohne stabilisierende Unterstützung nur halb so lang ist. Durch die kürzere Länge kann die Struktur stärker belastet werden, ohne auszuknicken. Im Falle der untersuchten und hier gezeigten Noppenstrukturen zeigt sich, dass die blauen Linien bei der symmetrischen Noppenwabe zudem in einem flacheren Winkel zu den Ebenen der Decklagen stehen, wodurch die Schubbelastung besser aufgenommen werden kann.

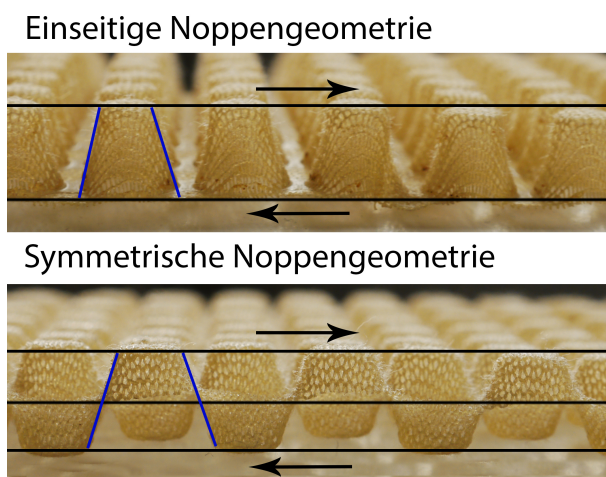


Abb. 7.12: Vergleich der Geometrie zwischen einseitiger und symmetrischer Noppenwabe

Die mit Textil 1 hergestellten sehr leichten Noppenwaben weisen, wie auch schon beim Druckversuch, nur geringe Festigkeiten auf. Die Untersuchungen zeigen, dass ein Raumgewicht von ca. 30 kg/m^3 nahe am unteren Limit einer mit den bisher verfügbaren Materialien herstellbaren Noppenwabe liegt. Hinsichtlich der Belastbarkeit müssen im Vergleich zu schwereren Noppenwaben Abstriche gemacht werden.

Obwohl die symmetrische Noppenwabe, wie in Abschnitt 3 beschrieben, auf einer Seite über eine geringere Anbindungsfläche an die Decklage verfügt als die einseitige Ausführung, versagten nahezu alle Probekörper im Kern, was auf eine für diesen Belastungsfall ausreichende Anbindung an die Decklagen hinweist. Eine Ausnahme stellten lediglich die Noppenwaben mit dem Harz Cy1 dar, welche sich bereits bei geringer Last von den Decklagen lösten. Die schlechte Anbindung dieser cyanatharzasierten Noppenwabe an die phenolharzbasierten Decklagen bestätigte sich auch im Trommelschälversuch, welcher im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

7.2.3 Anbindung an die Decklagen

Die Sandwichbauteile wurden im Trommelschälversuch nach DIN 53293 getestet, mit dem Ziel die Anbindung der Decklagen an das Kernmaterial zu untersuchen. „Das Prüfverfahren nach dieser Norm dient zur Ermittlung des Widerstandes von Kernverbunden gegen abschälende, senkrecht zur Deckschicht angreifende Kräfte“ [83]. Der Prüfaufbau ist in Abbildung 7.13 dargestellt.

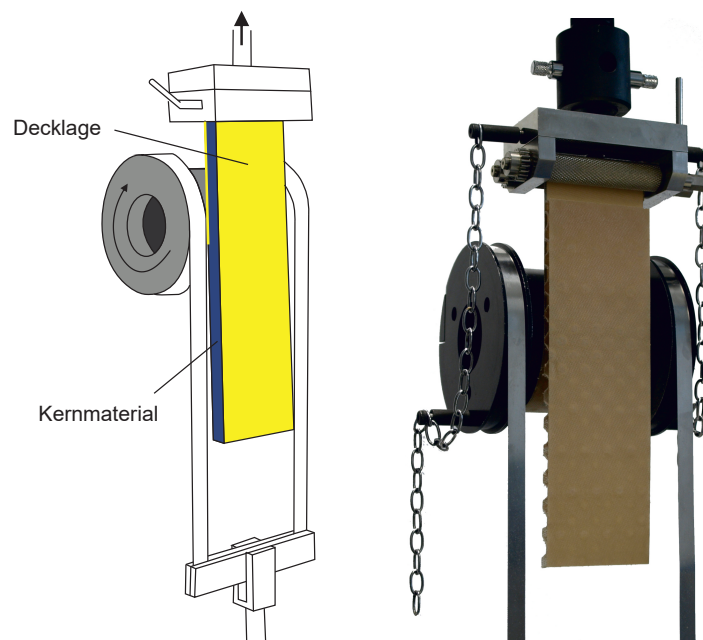


Abb. 7.13: Prüfaufbau des Trommelschälversuchs zur Untersuchung der Anbindung des Kernmaterials an die Decklagen

Bei der Versuchsdurchführung sind die Stahlbänder, auf denen die Trommel aufgerollt ist, unten fixiert. Die abzuschälende Decklage der Sandwichprobe wird oben in die Halterung und unten in die Trommel geklemmt. Bei einer Aufwärtsbewegung der oberen Halterung wird die Trommel ebenfalls nach oben gezogen und rollt dabei an den Stahlbändern ab, wodurch die Decklage vom Sandwichkern geschält wird. Aufgrund der Breite der Sandwichproben von 75 mm wird die Schälkraft in $\text{N}/75 \text{ mm}$ angegeben.

Neben den Messungen der verschiedenen Probekörper wird stets eine Leermessung durchgeführt, bei der ein Sandwichbauteil mit bereits abgelöster Decklage zur Bestimmung deren Eigensteifigkeit erneut gemessen wird. Aus der Differenz zwischen der Probenmessung und der Leermessung lässt sich anschließend eine Aussage über die Anbindung der Decklagen an das Kernmaterial treffen. Für die Messungen werden die Kräfte im Bereich des Travesenweges von 25 mm bis 45 mm betrachtet.

Exemplarisch sind die Messkurven symmetrischer Noppenwaben, hergestellt aus Textil 2 und Harz Ph1, in Abbildung 7.14 dargestellt. Hierbei handelt es sich bei den Proben 1 bis 5 um reguläre Messungen sowie eine zusätzliche Leermessung um die Eigensteifigkeit der Decklage zu bestimmen.

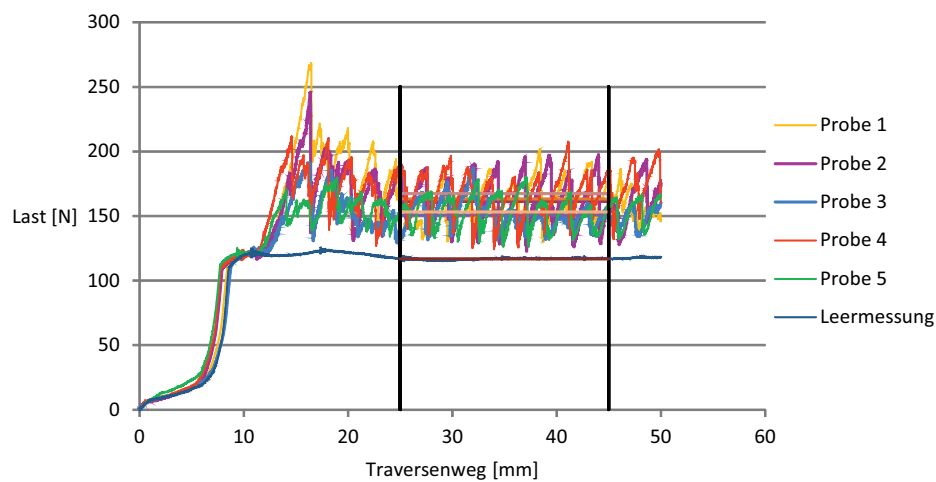


Abb. 7.14: Messkurven symmetrischer Noppenwaben im Trommelschälversuch (Textil 1, Harz Ph1), gemessen mit Decklage Isovolta Airpreg 8242 1-lagig

Gut zu erkennen ist der gezackte Kurvenverlauf, welcher sich aus der Noppenstruktur ergibt. Da das Kernmaterial nicht vollflächig sondern nur an den Noppendeckflächen an die Decklage anbindet, besteht in den Bereichen zwischen den Noppen keine Verbindung zwischen Noppenwabe und Decklage. In diesem Bereich fällt die Schälkraft fast auf den Wert der Leermessung ab, bevor sie bei erneuter Ablösung weiterer Noppenkontakte wieder ansteigt.

Zum Vergleich sind in Abbildung 7.15 die Messkurven eines Sandwichbauteils mit Kern aus Rohacell®51 RIST Schaum dargestellt, welche aufgrund der flächigen Anbindung des Kernmaterials an die Decklagen deutlich homogener verlaufen.

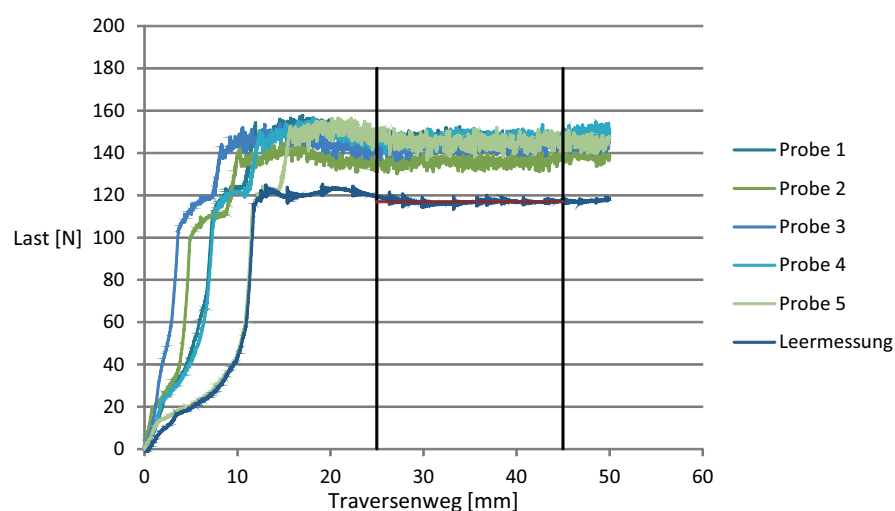


Abb. 7.15: Messkurven von Rohacell®51 RIST im Trommelschälversuch, gemessen mit Decklage Isovolta Airpreg 8242 1-lagig

Auffällig ist bei den Trommelschälversuchen, dass Noppenwaben mit Phenolharzmatrix eine deutlich bessere Anbindung an die verwendeten (Phenolharz-)Decklagen zeigen als solche mit Cyanatharz-

matrix. Vor allem das Cyanatharz (Harz Cy1) hat eine ungenügende Anbindung an die Decklagen, was sich durch niedrige Messwerte im Trommelschältest zeigt. Dies erklärt auch die Ergebnisse der durchgeführten Schubversuche bei den Proben mit diesem Harzsystem, bei denen das Versagen ausnahmslos zwischen Kern und Decklage auftrat. Die Gründe für die schlechtere Anbindung der Decklagen an die cyanatbasierten Noppenwaben wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht detailliert untersucht.

Im Gegensatz zur einseitigen Noppenwabe sind bei der symmetrischen Variante die Anbindungsflächen auf beiden Seiten des Kernmaterials gleich. Von der InnoMat GmbH durchgeführte systematische Untersuchungen an verschiedenen Textilien zeigen, dass neben der Anbindungsfläche auch das Textilmaterial sowie die verwendeten Harzsysteme, sowohl der Noppenwaben als auch der Decklagen, großen Einfluss auf die aufzuwendenden Schälkräfte haben.

Trommelschälmessungen an Sandwichproben mit einseitiger Noppenwabe, bei denen die Decklage an der Grundfläche (siehe Abbildung 4.27 rechts, S.26) abgeschält wurde, konnten nicht ausgewertet werden, da das Kernmaterial aufgrund der Druckbeanspruchung durch die Trommel eingedrückt wurde, bevor sich die Decklage ablöste.

Die im Trommelschälversuch ermittelten Schälkräfte abzüglich der Leermessung sind in Tabelle 7.6 aufgeführt.

Tab. 7.6: Im Trommelschälversuch untersuchte Kernmaterialien, gemessen mit Decklage Isovolta Airpreg 8242 1-lagig

Kernmaterial	Raumgewicht Kern [kg/m ³]	Schälkraft [N/75mm]
Airex R82.60*	60	96
Rohacell®51 RIST*	52	26,7
Rohacell®71 RIST*	75	30,3
Honeycomb C1 3,2-29 (l-Richtung)	29	162,7
Honeycomb C1 3,2-29 (w-Richtung)	29	114,5
NW sym. kont. Textil 2 - Harz Ph1 (Phenol)	51	42
NW sym. kont. Textil 2 - Harz Cy1 (Cyanat)	51	10,3
NW sym. kont. Textil 2 - Harz Cy2 (Cyanat)	53	34,7
NW sym. kont. Textil 1 - Harz Ph1 (Phenol)	30	56,8
NW einseitig diskont. (Textil 2 - Harz Ph1) (ABe Akustik 01) (Phenol)*	70	46,5

* Messungen von der InnoMat GmbH durchgeführt

Die im Bereich des Traversenwegs von 25 mm bis 45 mm gemittelten Trommelschälkräfte, der in Tabelle 7.6 aufgeführten Materialkombinationen sind in Abbildung 7.16 abzüglich der Leermessung in einem vergleichenden Diagramm zusammengestellt. Es ist zu erkennen, dass die Noppenwaben hinsichtlich der Anbindung an die Decklagen zwischen den Rohacell®-Schäumen und dem Airex-Schaum liegen.

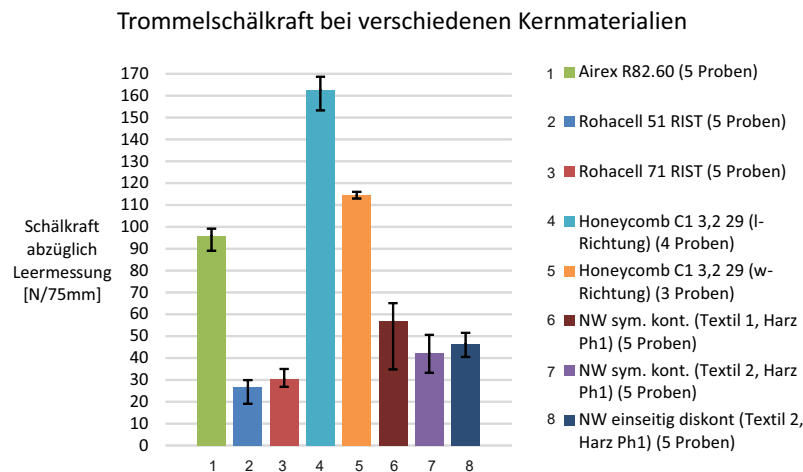


Abb. 7.16: Ergebnisse des Trommelschälversuchs bei verschiedenen Kernmaterialien (Schälkraft abzüglich Leermessung)

Da die Anbindung des Kernmaterials an die Decklagen neben dem verwendeten Kernmaterial stark von den Materialeigenschaften der Decklagen abhängig ist und je nach Harzsystem, Harzgehalt und Harzfluss im Prepreg große Abweichungen in den Schälkräften auftreten können, sind die Ergebnisse des Trommelschältests eher als grobe Orientierung zu verstehen. Wie frühere Versuche im Rahmen verschiedener Projekte zeigen, lässt sich die Anbindung der Decklagen an das Kernmaterial durch den Einsatz eines leichtgewichtigen Klebevlieses oder zusätzlichen Harzauftrag als Klebefilm verbessern.

7.2.4 Biegefestigkeit

Die Biegefestigkeit gibt Auskunft über die plastische Verformbarkeit bei Biegebeanspruchung. Der Kennwert beschreibt die maximalen Zug- oder Druckspannung in der Randfaser einer auf Biegung beanspruchten Probe bei Versagen. Die Sandwichproben wurden in Anlehnung an die Airbus-Vorgabe (Airbus Industries Test Method) „AITM1-0018“ im 4-Punkt-Biegeversuch untersucht. Die Auflager-spannweite beträgt bei dieser Prüfung 300 mm, die Lasteinleitungspunkte liegen 100 mm auseinander (s. Abbildung 7.17).

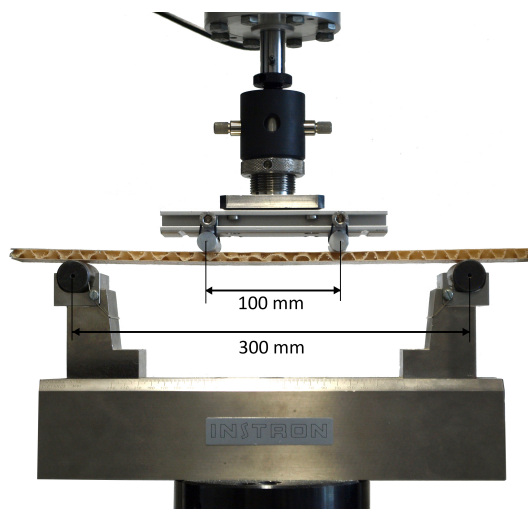


Abb. 7.17: Prüfaufbau für 4P-Biegeversuch

Die 4-Punkt-Biegeprüfung stellt von allen durchgeführten mechanischen Untersuchungen die aufschlussreichste Prüfung dar, da sie aufgrund zahlreicher unterschiedlicher Versagensfälle (siehe Kapitel 4.1.3) umfassende Informationen über Schwachstellen und die Belastbarkeit der Sandwichproben geben kann.

Sämtliche Probekörper wurden mit einlagiger Decklage aus Isovolta Airpreg PC 8242 geprüft. Die Biegebelastung auf die Probe hat eine Stauchung des Sandwiches oberhalb sowie eine Dehnung unterhalb der neutralen Faser zur Folge. Der Kern erfährt dabei neben der Biegebelastung auch eine Schubbelastung. (s. Abbildung 4.6, S. 10)

Bei der einseitigen Noppengeometrie hängt die Biegefestigkeit stark von der Orientierung des Kernmaterials ab. Bei nach oben gerichteten Noppen wird die gestauchte obere Decklage zwischen den Noppen nicht gestützt und knickt an diesen Stellen ein. Aufgrund der Geometrie versagt das Bauteil linienförmig an den jeweiligen Schwachstellen. Zeigen die Noppen bei identischem Belastungsfall nach unten, werden die ungestützten Bereiche der Decklagen auf Zug beansprucht, wodurch das Sandwichbauteil erst bei höheren Lasten versagt [84]. Eine gute Anbindung des Kernmaterials ist notwendig, um die Schubbelastung des Kerns auf die Decklagen übertragen zu können. Bei den Prüfungen traten verschiedene Versagensfälle auf, die im Folgenden diskutiert werden.

Bei Kernmaterialien mit schlechter Anbindung des Kernmaterials an die Decklagen lösen sich die oberen Decklagen ab und führten so zum Versagen des Bauteils. Diese Versagensart trat bei allen Proben der mit Harz Cy1 hergestellten symmetrischen Noppenwaben auf. Bereits im Trommelschälversuch fielen die Noppenwaben mit Cy1-Harz durch schwache Decklagenanbindung auf. Eine Ablösung der oberen Decklage ist in Abbildung 7.18 zu sehen.



Abb. 7.18: Ablösen der oberen Decklage bei Biegebeanspruchung - Symmetrische Noppenwabe mit Textil 2 - Harz Cy1

Eine bessere Anbindung der Decklagen an das Kernmaterial verhindert ein solches Ablösen der oberen Decklage. Wird die Decklage jedoch nicht ausreichend gestützt oder ist das Kernmaterial zu schwach, knickt diese ein, woraufhin das Bauteil ebenfalls versagt. Dieser Versagensfall trat sowohl bei den symmetrischen als auch bei den einseitigen Noppenwaben, mit nach oben orientierten Noppen auf. In den ungestützten Bereichen zwischen den Noppen knickte die obere Decklage, wie in Abbildung 7.19 zu sehen ist, ein und führte so zum Versagen der Probe.

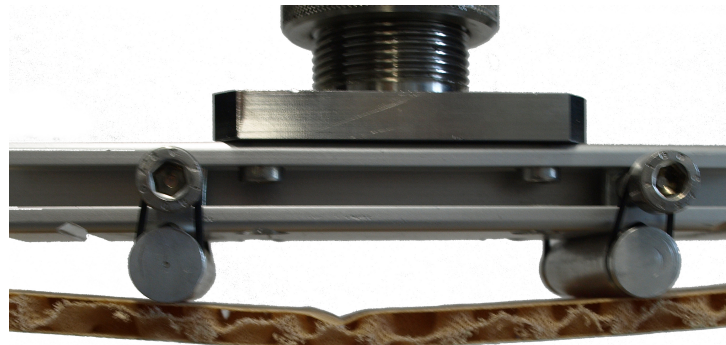


Abb. 7.19: Einknicken der oberen Decklage in den ungestützten Bereichen zwischen den Noppen

Da die Ergebnisse im 4-Punkt-Biegeversuch sehr von den verwendeten Decklagen und dem Prüfaufbau abhängen, sind auch diese Ergebnisse in quantitativer Hinsicht eher als Orientierung zu verstehen, geben jedoch wertvolle qualitative Informationen über die Schwachstellen des Sandwichaufbaus. In Tabelle 7.7 ist eine Auswahl der im 4-Punkt-Biegeversuch untersuchten Kernmaterialien aufgelistet.

Die Übersicht zeigt, dass Honeycombs im Biegeversuch ebenso wie in anderen mechanischen Untersuchungen die höchsten spezifischen Festigkeitswerte erreichen. Die Noppenstruktur ist aufgrund der geringeren Anbindungsfläche an die Decklagen und den freien Bereichen zwischen den Noppen bei einer Biegebeanspruchung den getesteten Schaummaterialien unterlegen. Die im Trommelschälversuch bereits auffällige, schwache Anbindung der Noppenwabe mit Cyanatharzmatrix verhindert auch im 4-Punkt-Biegeversuch das Erreichen besserer Ergebnisse, da sich die obere Decklage bereits vor dem Versagen des Kernmaterials ablöst. Abbildung 7.20 stellt die Biegefestigkeit der untersuchten Kernmaterialien über dem Raumgewicht dar.

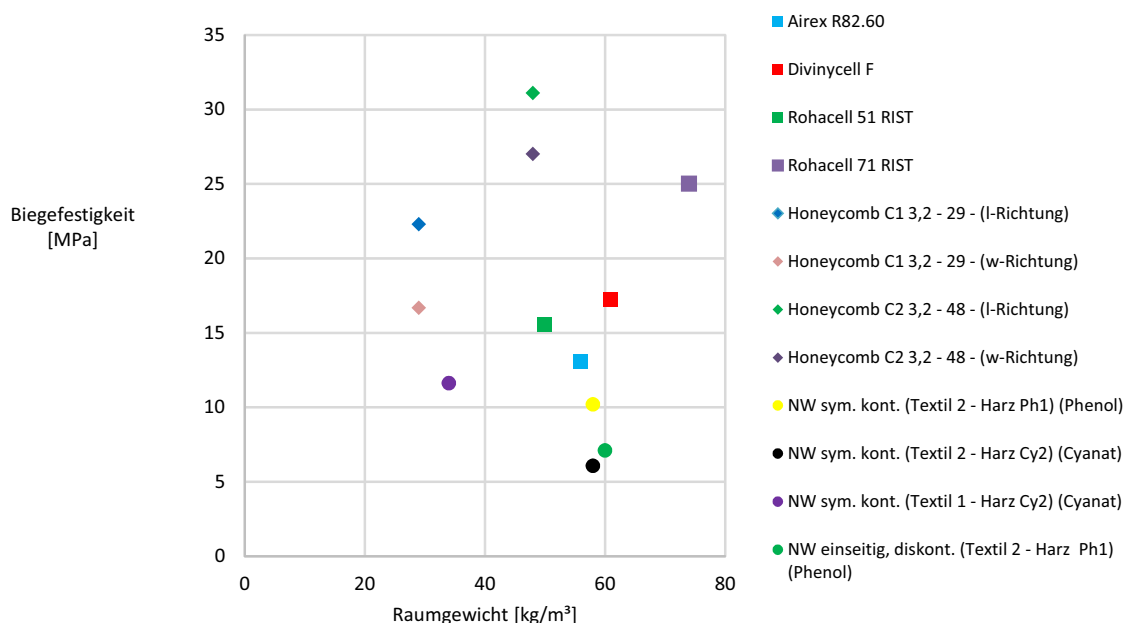


Abb. 7.20: Ergebnisse des 4P-Biegeversuchs: Darstellung der Biegefestigkeit über dem Raumgewicht der Kernmaterialien

Tab. 7.7: Im 4P-Biegeversuch untersuchte Kernmaterialien, gemessen mit Decklage Isovolta Airpreg 8242 1-lagig

Kernmaterial	Höhe [mm]	Raumgewicht Kern [kg/m^3]	max. Biegekraft [N]	max Biege- spannung [MPa]	Versagensart
Airex R82.60*	10,31	56	231,5	13,05	lokales Decklagenversagen an Lasteinleitung
Divinycell F50*	8,96	61	233,5	17,25	lokales Decklagenversagen an Lasteinleitung
Rohacell®51 RIST*	10,36	50	281,7	15,57	lokales Decklagenversagen an Lasteinleitung
Rohacell®71 RIST*	10,41	74	454,6	25,01	lokales Decklagenversagen an Lasteinleitung
Honeycomb C1 3,2-29 (l-Richtung)	10,4	29	400	22,29	lokales Decklagenversagen an Lasteinleitung
Honeycomb C1 3,2-29 (w-Richtung)	10,4	29	295	16,67	lokales Decklagenversagen an Lasteinleitung
Honeycomb C2 3,2-48 (l-Richtung)	10,5	48	570,5	31,1	lokales Decklagenversagen an Lasteinleitung
Honeycomb C2 3,2-48 (w-Richtung)	10,5	48	490,4	27	lokales Decklagenversagen an Lasteinleitung
NW sym. kont. Textil 2 - Harz Ph1 (senkrecht) (Phenol)	7,11	51	87	10,2	Einknicken / Delamination der oberen Decklage
NW sym. kont. Textil 2 - Harz Cy2 (senkrecht) (Cyanat)	7,88	53	62	6,06	Delamination der oberen Decklage
NW sym. kont. Textil 1 - Harz Cy2 (senkrecht) (Cyanat)	4,85	31	31,43	8,07	Einknicken der oberen Decklage
NW sym. kont. Textil 1 - Harz Cy2 (raute) (Cyanat)	5,10	34	50,57	11,62	Noppenwabe durch Druck an Lasteinleitung zerstört
NW einseitig diskont. (Textil 2 - Harz Ph1) (ABe Akustik 01) (Phenol)*	10,12	60	120,8	7,1	Delamination der oberen Decklage

* Messungen von der InnoMat GmbH durchgeführt

7.2.5 Impact-Verhalten

Neben den bisher beschriebenen mechanischen Untersuchungen wurden Sandwichplatten mit Noppenwabenkern auch hinsichtlich ihres Impact-Verhaltens, dem Verhalten schlagartiger Beanspruchung durch einen Fallbolzen, untersucht und mit Referenzproben mit Honeycombkern verglichen. Generell können Impact-Belastungen in Belastungen mit niedriger, mittlerer oder hoher Impact-Geschwindigkeit eingeteilt werden. Die Abgrenzung untereinander ist jedoch nicht eindeutig und es existieren unterschiedliche Definitionen. Sjöblom et al. definieren Impact-Belastungen mit niedriger Geschwindigkeit als quasi-statisch, wobei das obere Limit der Impact-Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Probensteifigkeit zwischen einem und mehreren 10 m/s liegt [85]. Cantwell und Morton definieren eine langsame Impact-Geschwindigkeit bis zur Grenze von 10 m/s [86]. Die Impact-Geschwindigkeiten im durchgeführten Versuch lagen zwischen 1,2 m/s und 2,05 m/s, womit es sich

nach beiden Definitionen um Impact-Belastungen bei niedriger Geschwindigkeit handelt. Derartige Belastungen können beispielsweise durch einen auf das Panel herabfallenden Gegenstand, wie z.B. einen Hammer, auftreten.

Bereits im Rahmen eines früheren BMBF-Verbundvorhabens (Bundesministerium für Bildung und Forschung) wurden Impact-Untersuchungen an Sandwichproben mit einseitigen Noppenwaben als Kernmaterial im Vergleich zu Honeycombs durchgeführt [87]. Die Proben wurden dabei mit Impact-Energien von 1,3 J und 5 J belastet, wobei sich zeigte, dass die Decklage bei Sandwichproben mit Noppenwabe als Kernmaterial bei der höheren Belastung zwar deformiert wurde, jedoch nicht komplett versagte. Bei den Proben mit Honeycomb-Kern wurde die Decklage bei einer Impact-Last von 5 J durchstoßen. Ergänzend zu den genannten Versuchen werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit Sandwichproben mit symmetrischer Noppenwabe als Kernmaterial untersucht und mit Honeycomb-Sandwiches verglichen.

Wie auch bei den bisher beschriebenen mechanischen Untersuchungen kamen für die Probekörper einlagige Decklagen aus Isovolt Airpreg PC 8242 zum Einsatz. Für die Versuche wurden Referenzproben mit Honeycomb (C2 3,2-48) als Kernmaterial hergestellt. Die ausgewählten Honeycombs verfügen über eine Kernhöhe von 8 mm und ein Raumgewicht von 48 kg/m^3 . Diese werden mit Proben aus symmetrischer Noppenwabe (Textil 1 - Harz Ph1) verglichen, welche ebenfalls eine Noppenhöhe von 8 mm und ein Raumgewicht von ca. 53 kg/m^3 aufweisen. Die Sandwichplatten für den Impact-Versuch wurden mit Hilfe des Vakuumsack-Verfahrens mit einem Unterdruck von 0,4 bar hergestellt und in einem Trockenschrank des Herstellers Vötsch Industrietechnik GmbH [G7] bei 135°C für 80 min ausgehärtet (einschließlich 5 Minuten Aufheizzeit).

Aus den Platten wurden Probekörper mit den Maßen $120 \times 120 \text{ mm}^2$ ausgeschnitten und in einem „Imatek IM10“ Impact-Prüfstand [G3] untersucht. Die herabfallende Impact-Masse lag bei 3,53 kg. Der auf die Probe auftreffende, sphärische Stoßkörper besaß einen Durchmesser von 16 mm. Die Proben waren für den Versuch auf einer Grundplatte mit einer mittig positionierten kreisförmigen Aussparung mit einem Durchmesser von 75 mm fixiert. Der Prüfaufbau ist in Abbildung 7.21 dargestellt.

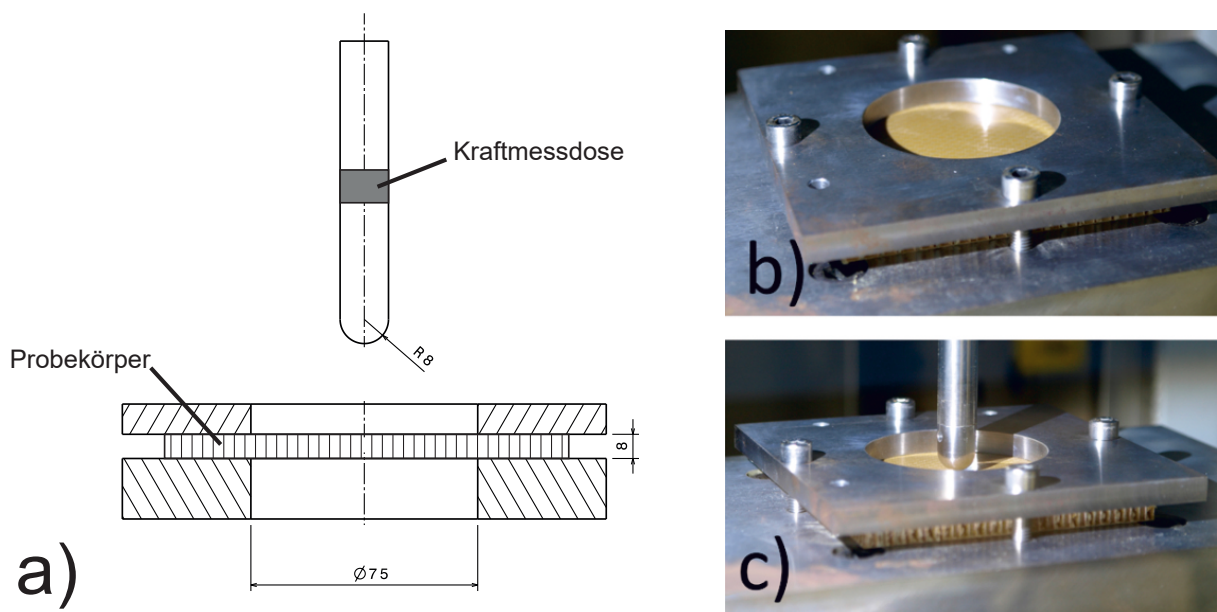


Abb. 7.21: Versuchsaufbau für Impact-Test; a) Seitenansicht des Aufbaus; b) Fixierung der Probe; c) Sandwichplatte mit Fallbolzen

Die Probekörper wurden mit Impact-Energien von 3 J, 4 J, 5 J, 6 J und 7 J beansprucht indem die Fallhöhe schrittweise erhöht wurde. Aufgrund von Reibung lag die tatsächliche Impact-Energie stets etwas unterhalb der voreingestellten Energie (s. Tabelle 7.8).

Tab. 7.8: Vergleich zwischen voreingestellter und tatsächlicher Impact-Energie

NW = Noppenwabe HC = Honeycomb

Probe	Voreingestellte Impact-Energie (J)	Tatsächliche Impact-Energie (J)	Impact-Geschwindigkeit (m/s)
NW sym 3J - 1 / 2 / 3	3	2,65 / 2,66 / 2,68	1,23 / 1,23 / 1,23
NW sym 4J - 1 / 2 / 3	4	3,67 / 3,60 / 3,61	1,44 / 1,43 / 1,43
NW sym 5J - 1 / 2 / 3	5	4,52 / 4,52 / 4,59	1,60 / 1,60 / 1,61
NW sym 6J - 1 / 2 / 3	6	5,52 / 5,50 / 5,51	1,77 / 1,77 / 1,77
NW sym 7J - 1 / 2 / 3	7	6,40 / 6,40 / 6,43	1,90 / 1,90 / 1,91
NW sym 8J - 1 / 2 / 3	8	7,30 / 7,40 / 7,39	2,03 / 2,05 / 2,05
HC 3J - 1 / 2 / 3	3	2,64 / 2,67 / 2,67	1,22 / 1,23 / 1,23
HC 4J - 1 / 2 / 3	4	3,61 / 3,59 / 3,64	1,43 / 1,43 / 1,44
HC 5J - 1 / 2 / 3	5	4,57 / 4,51 / 4,61	1,61 / 1,60 / 1,62
HC 6J - 1 / 2 / 3	6	5,54 / 5,52 / 5,52	1,77 / 1,77 / 1,75
HC 7J - 1 / 2 / 3	7	6,42 / 6,42 / 6,43	1,91 / 1,91 / 1,91

Es wurden jeweils drei Proben pro Impact-Energie geprüft. In Abhängigkeit von der Fallhöhe verursacht die Impact-Belastung mehr oder weniger ausgeprägte Schäden an den Sandwichproben. Schubel, Luo und Daniel ermittelten vier verschiedene Versagensfälle für Impact-Schäden an Sandwichpanels mit Schaumkern. Diese sind: Delamination in der Decklage, Matrix-Versagen und Faserbruch, Versagen der Verbindung zwischen Kern und Decklage sowie Versagen des Kernmaterials (permanente Deformation) im Bereich rund um die Impact-Stelle [88]. Für die untersuchten Sandwichstrukturen ist die Delamination in der oberen Decklage nicht relevant, da sie nur aus einem einlagigen Prepreg besteht. Auch unterscheiden sich die Versagensmechanismen von Honeycombs und Noppenwaben deutlich von Schäumen, sodass die genannten Versagensmechanismen nicht übertragbar sind und im Rahmen dieser Arbeit lediglich zwischen zwei Versagensfällen unterschieden wird.

Niedrige Energien (3 J, 4 J) schädigen die Decklage und hinterlassen eine Delle in der Oberfläche der Probe. Dieser Fall wird als Versagensfall A bezeichnet. Bei höheren Impact-Belastungen unterscheidet sich das Schadensbild, da die Decklage komplett durchstoßen wird. Ein solches Versagen entspricht dem Versagensfall B. Der Unterschied zwischen beiden Versagensfällen ist in Abbildung 7.22 dargestellt.

a) Honeycomb - Versagensfall A - Eingedellte Decklage



c) Noppenwabe - Versagensfall A - Eingedellte Decklage



b) Honeycomb - Versagensfall B - Durchstoßene Decklage



d) Noppenwabe - Versagensfall B - Durchstoßene Decklage



Abb. 7.22: links: Honeycomb-Probe nach 4 J (a) und 7 J (b) Impact-Beanspruchung
rechts: Noppenwaben-Probe nach 4 J (c) und 8 J (d) Impact-Beanspruchung

Für den Versagensfall A mit eingedellter Decklage weisen beide Sandwichstrukturen einen ähnlichen Kraftverlauf in Abhängigkeit von der Verformung auf. Abbildung 7.23 stellt diesen Zusammenhang für die Honeycomb- und Noppenwaben-Struktur bei vorgegebenen Impact-Lasten von 3 J, 4 J und 5 J dar.

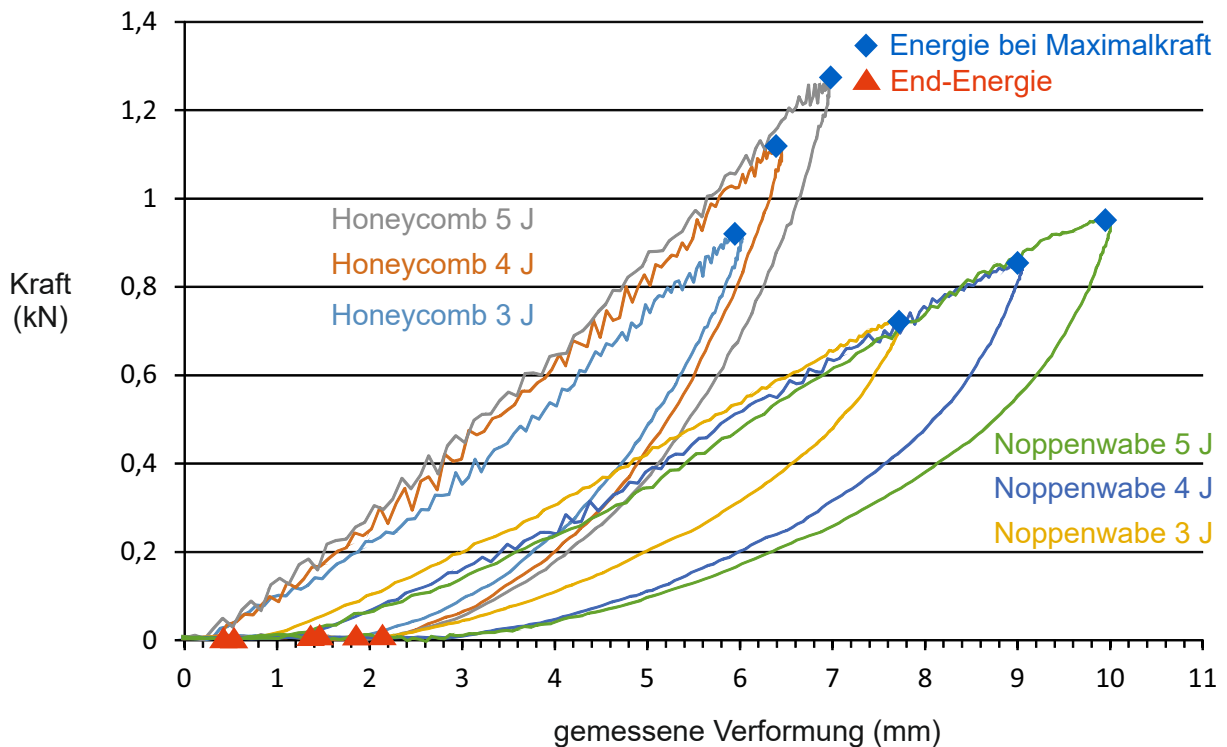


Abb. 7.23: Kraft in Abhängigkeit der gemessenen Verformung bei Honeycomb- und Noppenwaben-Sandwiches bei Impact-Lasten von 3 J, 4 J und 5 J (in allen Fällen Versagensfall A)

Bei allen Proben ist eine Hysterese in den Kraftverläufen zu erkennen, welche Indiz einer teilweise plastischen Verformung ist. Die steileren Anstiege der Kraftkurven bei den Honeycomb-Proben weisen auf eine höhere Steifigkeit dieses Kernmaterials im Vergleich zur Noppenwabe hin. Bei vergleichbaren Impact-Lasten wird der Fallbolzen bei den Honeycomb-Proben deutlich stärker abgebremst, woraus eine höhere Maximalkraft und eine deutlich geringere Verformung im Vergleich zu den Noppenwaben-Proben resultieren.

Die hexagonale Struktur der Honeycomb-Waben hat neben einer höheren Steifigkeit auch zur Folge, dass der Übergang von Versagensfall A zu B bereits bei niedrigeren Impact-Lasten eintritt. Sobald die Decklage vom Fallbolzen durchstoßen wird, ist die Verformung komplett irreversibel. Abbildung 7.24 zeigt den Kurvenverlauf von Kraft- und Energiekurve bei beiden Versagensfällen bei Impact-Lasten von 7 J. Der Anteil elastischer und plastischer Verformung kann durch den Vergleich der Energie bei Maximalkraft und End-Energie ermittelt werden. Für Versagensfall A mit eingedellter Decklage liegt das Energielevel bei Maximalkraft höher als die End-Energie, wohingegen sich dieses Verhältnis für den Versagensfall B mit durchstoßener Decklage umkehrt.

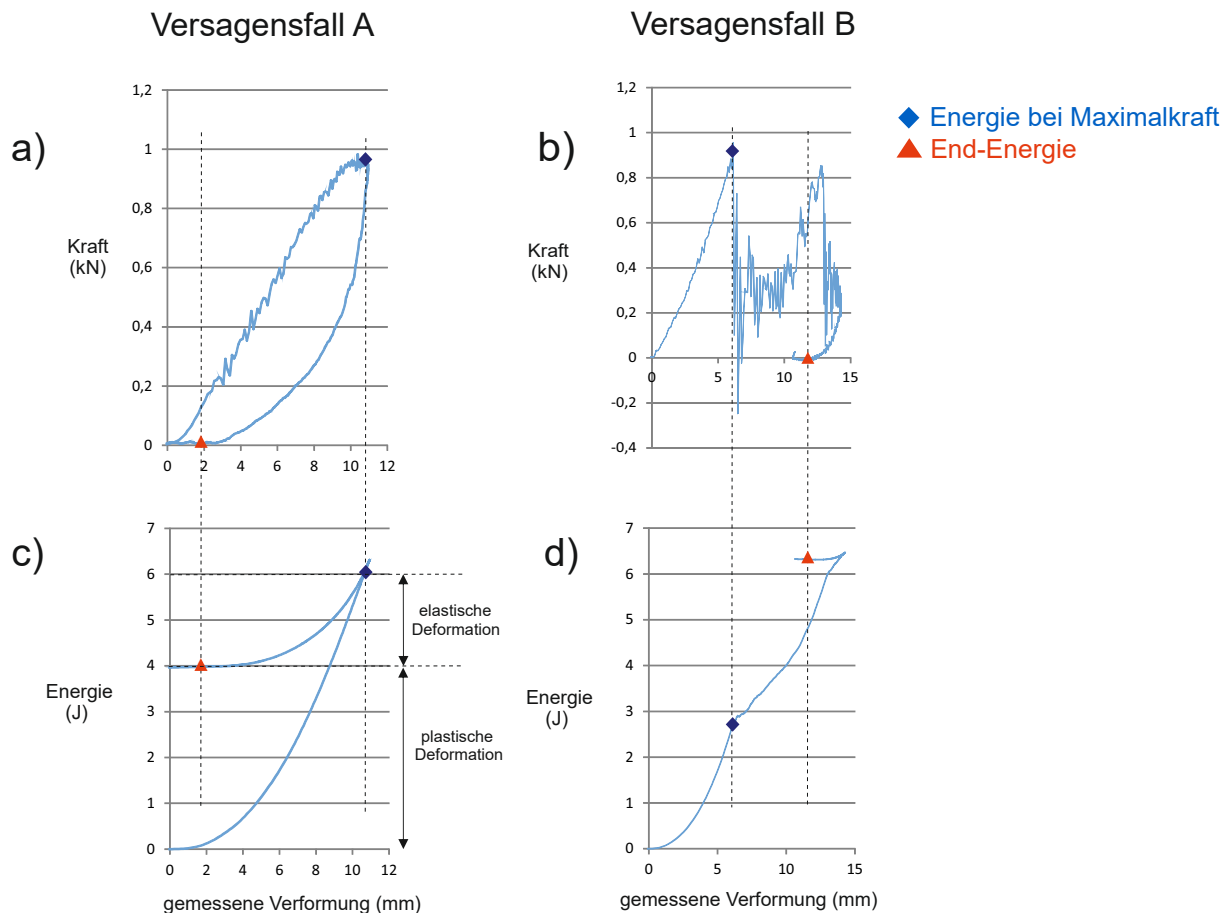


Abb. 7.24: a) Kraft in Abhängigkeit der gemessenen Verformung für Noppenwaben-Sandwich bei 7 J Impact-Last
 b) Kraft in Abhängigkeit der gemessenen Verformung für Honeycomb-Sandwich bei 7 J Impact-Last
 c) Energie in Abhängigkeit der gemessenen Verformung für Noppenwaben-Sandwich bei 7 J Impact-Last
 d) Energie in Abhängigkeit der gemessenen Verformung für Honeycomb-Sandwich bei 7 J Impact-Last

Der Kurvenverlauf der Energiekurve kann bei jedem der beiden Versagensfälle in zwei Abschnitte aufgeteilt werden. Versagensfall A ist in Abbildung 7.24 a) und c) dargestellt. Charakteristisch für eine elastische Verformung steigt die Kurve in Abbildung 7.24c parabolisch bis zum Punkt der „Energie bei Maximalkraft“, an dem die gemessene Verformung ihr Maximum erreicht. Danach federt die Sandwichstruktur zurück und die Kurve fällt parabolisch, jedoch mit geringerer Steigung bis auf das Niveau der End-Energie. Der Betrag zwischen Energie bei Maximalkraft und End-Energie entspricht der elastischen Verformung der Sandwichstruktur. Die plastische Verformung ergibt sich dagegen aus dem Betrag zwischen Ursprung und End-Energie.

Versagt das Bauteil nach Versagensfall B mit durchstoßener Decklage, ändert sich der Kurvenverlauf grundlegend (s. Abbildung 7.24b), d)). In diesem Fall steigt die Kurve in Abbildung 7.24d ebenfalls parabolisch bis zum Punkt der „Energie bei Maximalkraft“, der Fallbolzen dringt jedoch nach dem Reißen der Decklage in das Sandwich Bauteil ein. Dies ist anhand des weiteren, näherungsweise linearen Kurvenverlaufs zu erkennen. Die Kurve steigt bis zu einem weiteren Maximum an, welches durch die rückseitige Decklage verursacht wird, fällt jedoch nicht mehr signifikant ab, was bedeutet, dass die Sandwichstruktur nicht nennenswert zurückfedert und somit keine Energie zurück gibt.

Wie bereits beschrieben, wird die Decklage bei Noppenwaben- im Vergleich zu Honeycomb-Sandwiches erst bei höheren Lasten durchstoßen. Tabelle 7.9 listet die Maximalkraft, die Energie bei Maximalkraft sowie die End-Energie für die geprüften Proben auf.

Tab. 7.9: Messwerte symmetrischer Noppenwaben und Honeycombs bei verschiedenen Impact-Lasten, gemessen mit Decklage Isovolt Airpreg 8242 1-lagig

Probe	Maximalkraft (kN)	Energie bei Maximalkraft (J)	End-Energie (J)
NW sym 3J - 1 / 2 / 3	0,83 / 0,85 / 0,88	2,77 / 2,75 / 2,74	1,23 / 1,26 / 1,25
NW sym 4J - 1 / 2 / 3	0,96 / 0,99 / 1,02	3,68 / 3,65 / 3,71	1,87 / 1,65 / 1,81
NW sym 5J - 1 / 2 / 3	1,09 / 1,12 / 1,06	4,55 / 4,53 / 4,67	2,33 / 2,37 / 2,51
NW sym 6J - 1 / 2 / 3	0,99 / 1,16 / 1,14	5,54 / 5,51 / 5,55	3,39 / 2,99 / 3,15
NW sym 7J - 1 / 2 / 3	1,09 / 0,81 / 1,30	6,17 / 6,27 / 6,44	3,98 / 4,57 / 3,83
NW sym 8J - 1 / 2* / 3*	1,09 / 1,14 / 1,34	7,05 / 5,95 / 6,11	4,87 / 6,50 / 6,45
HC 3J - 1 / 2 / 3	1,05 / 1,06 / 1,04	2,73 / 2,72 / 2,78	1,44 / 1,44 / 1,36
HC 4J - 1 / 2 / 3	1,17 / 1,28 / 1,25	3,66 / 3,63 / 3,67	2,03 / 1,95 / 1,95
HC 5J - 1 / 2* / 3*	1,47 / 1,34 / 1,04	4,58 / 3,71 / 2,88	2,50 / 4,34 / 4,21
HC 6J - 1* / 2* / 3*	0,93 / 0,81 / 1,30	2,06 / 1,93 / 3,43	5,85 / 5,95 / 5,56
HC 7J - 1* / 2* / 3*	1,02 / 1,14 / 1,34	2,63 / 2,80 / 3,69	6,36 / 6,09 / 6,03

* Versagensfall B mit durchstoßener Decklage

Bemerkenswert ist die Tatsache, dass die Energie bei Maximalkraft deutlich geringer ist, wenn die Decklage durchstoßen wird (s. Abbildung 7.25).

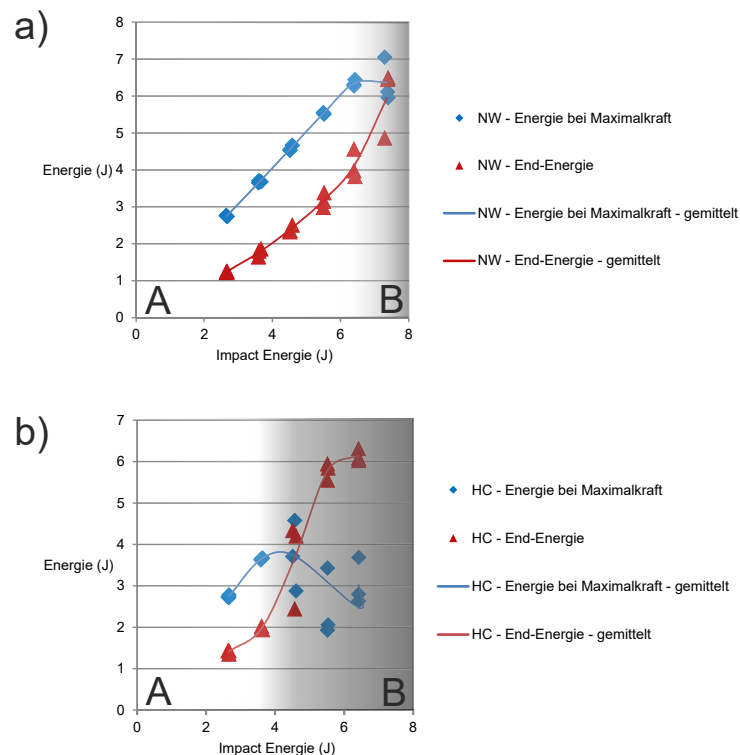


Abb. 7.25: a) Energie bei Maximalkraft und End-Energie in Abhängigkeit von der Impact-Belastung bei Noppenwaben-Sandwiches
 b) Energie bei Maximalkraft und End-Energie in Abhängigkeit von der Impact-Belastung bei Honeycomb-Sandwiches
 (Heller Hintergrund für Versagensfall A bzw. dunkel für Versagensfall B)

Die Energien, welche im oberen Teil der Abbildung 7.25 aufgetragen sind, beziehen sich auf die untersuchten Noppenwaben-Sandwiches. Die Energie bei Maximalkraft steigt mit zunehmender Impact-Belastung nahezu linear an, solange die Decklage nicht einreißt. Entsprechend dem Versagensfall A ist diese Energie höher als die End-Energie. Die Differenz zwischen beiden Levels entspricht der elastischen Verformung des Sandwichbauteils (s. Abbildung 7.24c). Mit höheren Impact-Lasten ändert sich das Schadensbild und bei 8 J versagten zwei von drei Proben entsprechend Versagensfall B mit durchstoßener Decklage.

Ein ähnliches Bild zeigen die gemessenen Energiewerte der Honeycomb-Proben im unteren Teil der Abbildung 7.25, jedoch findet hier der Übergang von Versagensfall A zu B deutlich früher statt. Bereits bei einer Impact-Energie von 5 J versagten 2 von 3 Proben mit durchstoßener Decklage. Weitere Proben, welche mit höheren Impact-Lasten geprüft wurden, versagten auf die gleiche Weise.

Abbildung 7.26 zeigt ein Noppenwaben-Sandwich (rechts) mit eingedellter sowie ein Sandwich mit Honeycomb-Kern (links) und komplett durchstoßener Decklage. Günstig ist die bei der Noppenwabe punktförmige Anbindung an das Kernmaterial, da sich auf diese Weise die Decklage innerhalb eines gewissen Rahmens verformen und die Impact-Energie flächig verteilt werden kann. Dies ist auch anhand der großflächig beschädigten Decklage zu sehen, welche helle Linien in Form eines diagonal orientierten Kreuzes aufweist. Entlang dieser Linien wird die Decklage stark verformt und weist nach dem Versuch Falten auf.

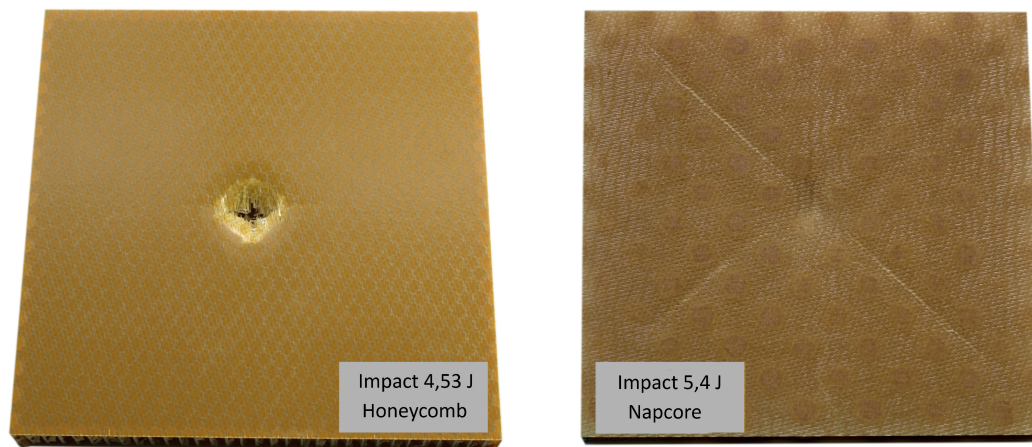


Abb. 7.26: links: Honeycomb-Sandwich mit durchstoßener Decklage nach Impact-Belastung mit 4,53 J
rechts: Noppenwaben-Sandwich mit eingedellter Decklage nach Impact-Belastung mit 5,4 J

Aufgrund der vertikal orientierten Zellwände kann die Impact-Last im Honeycomb-Sandwich kaum weitergeleitet werden, wodurch die Probe relativ lokal geschädigt wird. Im Gegensatz zur Noppenwaben-Probe sieht die Oberfläche des Honeycomb-Sandwiches abseits der Einschlagstelle vollkommen intakt aus. Die für die Noppenwabe charakteristischen Eigenschaften gegenüber punktueller Impact-Belastung eröffnen möglicherweise interessante Anwendungsfelder für leichtgewichtige Platten mit hoher Toleranz gegenüber punktuellen Impact-Lasten, wie sie z.B. in Cargo-Containern zum Einsatz kommen können.

7.3 Untersuchung der Brandeigenschaften

An die Noppenwabe als Kernmaterial werden je nach Anwendung hohe Anforderungen bezüglich der Brandeigenschaften gestellt, wobei das FST-Verhalten im Flugzeuginterior-Bereich besonders wichtig ist. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Noppenwaben-Sandwiches aus verschiedenen Materialkombinationen hergestellt, in einem Cone-Calorimeter des Herstellers FTT [G1] geprüft und hinsichtlich Entzündungsverhalten, Wärmefreisetzung und Rauchentwicklung in Anlehnung an ISO 5660 untersucht [89]. Ebenso wie bei den mechanischen Prüfungen wurden einlagige Decklagen aus dem Phenolharzprepreg Isovolt Airpreg PC 8242 verwendet.

Für den Test werden rechteckige Proben mit einer Kantenlänge von $100 \times 100 \text{ mm}^2$ mittels eines elektrischen Heizkegels einem definierten Wärmestrom von 50 kW/m^2 ausgesetzt und freigesetzte Gase durch einen elektrischen Funkengenerator entzündet. Der Abgasstrom wird während der Untersuchung über einen Abzug abgeleitet, wobei kontinuierlich ein Probenstrom entnommen wird, sodass Sauerstoff-, Kohlendioxid- und Kohlenmonoxid-Gehalt bestimmt werden können. Neben dem Masseverlust der Probe während des Versuches werden weiterhin die Wärmefreisetzungsrate sowie die Rauchentwicklung kontinuierlich erfasst. Der Versuchsaufbau des Cone-Calorimeters ist in Abbildung 7.27 dargestellt.

Messung der Lichtschwächung (Laser) und Rauchtemperaturmessung

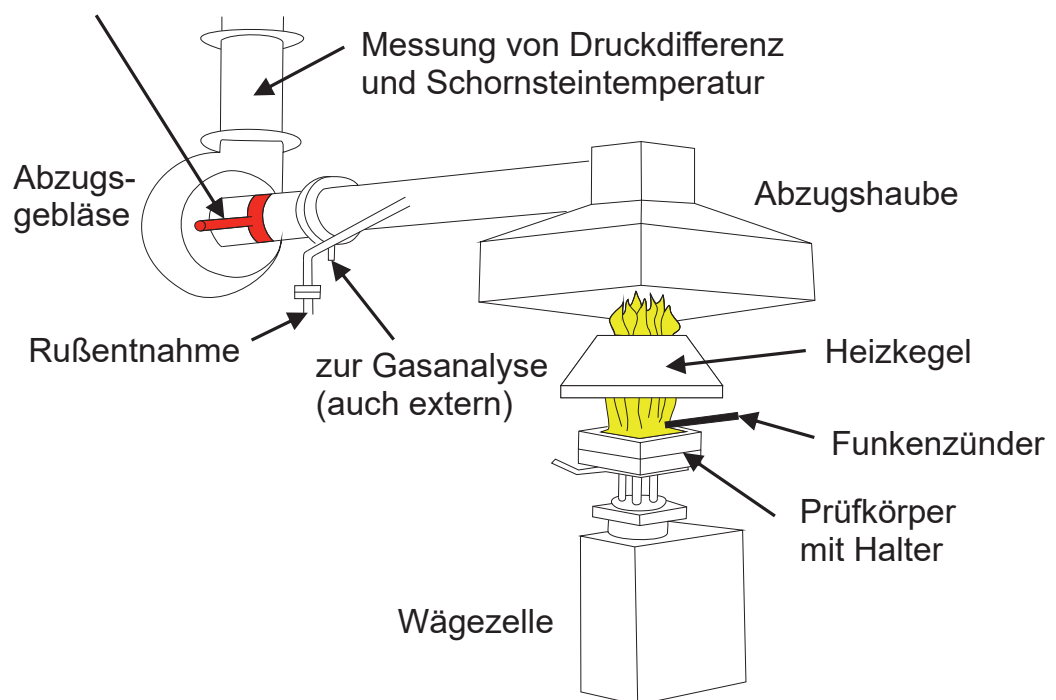


Abb. 7.27: Prüfaufbau der Brandversuche am Cone-Calorimeter (eigene Darstellung nach [90])

Zur Bewertung des Brandverhaltens werden folgende quantitative Parameter im Versuch ermittelt.

- Entzündungszeit (TTI - Time To Ignition [s])
- Verlöschungszeit (TFO - Time to Flameout [s])
- Zeitpunkt der maximalen Wärmefreisetzungsrate (THRR - Time to Heat Release Rate peak)
- Max. Wärmefreisetzungsrate (HRR peak - Heat Release Rate peak)

- Maximalwert der mittleren Wärmeemission (MARHE - Maximum Average Rate of Heat Emission)
- Gesamtwärmefreisetzung (THR - Total Heat Release)
- Maximaler Extinktionskoeffizient (EXT peak)
- Gesamte Rauchgasfreisetzung (TSR - Total Smoke Release)
- Masseverlust (Δm)

Besonders wichtig für die Beurteilung der Brandeigenschaften sind die maximale Wärmefreisetzungsrate (HRR peak), der Maximalwert der mittleren Wärmeemission (MARHE), die Gesamtwärmefreisetzung (THR) sowie die gesamte Rauchgasfreisetzung (TSR). Die ermittelten Ergebnisse geben zwar einen guten Überblick über das Brandverhalten der untersuchten Kernwerkstoffe, sind jedoch für einen Vergleich nur eingeschränkt aussagekräftig, da die Kernmaterialien unterschiedliche Raumgewichte aufweisen und die Probekörper damit unterschiedlich schwer sind. Aufgrund der Tatsache, dass die Probekörper mit Decklagen getestet wurden, lassen sich die Ergebnisse nicht auf das Probengewicht normieren, da der Anteil der durch die Decklagen verursachten Brandlast bei den verschiedenen Sandwichproben unterschiedlich hoch ist. Eine Messung ohne die Decklagen ist allerdings nicht sinnvoll, da die verschiedenen Kernmaterialien sich deutlich in ihrer Struktur und damit in der Größe ihrer Oberfläche unterscheiden. Die Decklagen tragen während der Brandversuche dazu bei, die Oberflächen der Probekörper vergleichbar zu machen und dem Wärmestrom eine identische Angriffsfläche zu bieten. Die gemittelten Kennwerte der im Cone-Calorimeter untersuchten Kernmaterialien (jeweils 3 Proben) sind in Tabelle 7.10 aufgeführt.

Tab. 7.10: Im Cone-Calorimeter untersuchte Kernmaterialien (gemessen mit Decklagen Isovolt Airpreg 8242 1-lagig)

Kernmaterial	Höhe [mm]	Masse [g]	TTI [s]	TFO [s]	HRR peak [kW/m ²]	MARHE [kW/m ²]	THR [MJ/m ²]	TSR [m ² /m ²]	Rückstand [%]
Airex R82.60	10	16,4	88,5	194	100	23,8	3,7	124,2	79,8
Divinycell F50	10	15,9	68,5	204	197	40,5	6,6	250,3	70,5
Rohacell®51 RIST	10	15,4	19,3	251	234,3	101,7	14,3	312	56,3
Rohacell®71 RIST	10	17,9	14,3	259	223	130,7	20,9	454,7	48
Honeycomb C2 3,2-48	10	14,7	64,5	179,7	105,5	30,5	4,3	66,2	79,7
NW sym. kont. Textil 2 - Harz Ph1 (Phenol)	7,9	14,5	—	—	19	8,3	7,8	92,3	58,3
NW sym. kont. Textil 2 - Harz Cy1 (Phenol)	7,4	13,9	46,7	163,7	224	69,3	7,7	370	67,3
NW sym. kont. Textil 2 - Harz Cy2 (Cyanat)	7,8	13,9	60	160	184,7	50,7	6,5	258	71,7
NW sym. kont. Cellulose-Textil - Harz Ph1 (Phenol)	10,6	14,7	64,8	231,8	147,3	81,3	5,3	128	69,75

Der HRR peak gibt Auskunft über die maximale Wärmefreisetzung während der Prüfung. Zur Zertifizierung von Luftfahrtmaterialien werden die zu prüfenden Materialien in einer OSU-Kammer, einer Entwicklung der Ohio-State-University, nach der Norm „FAR/JAR 25.853 Appendix F“ mit einem Wärmestrom von 35 kW/m² geprüft. Die an der PYCO durchgeführten Untersuchungen im Cone-Calorimeter entsprechen nicht der zitierten Norm, lassen aber dennoch Rückschlüsse auf das Brandverhalten zu. Wird im Cone-Calorimeter ein HRR peak < 200 kW/m² gemessen, kann anhand von Erfahrungswerten aus bisherigen Messungen davon ausgegangen werden, dass das Sandwich auch in der OSU-Kammer die Grenzwerte einhält. Das Diagramm in Abbildung 7.28 stellt die maximale

Wärmefreisetzungsrate der untersuchten Kernmaterialien gegenüber.

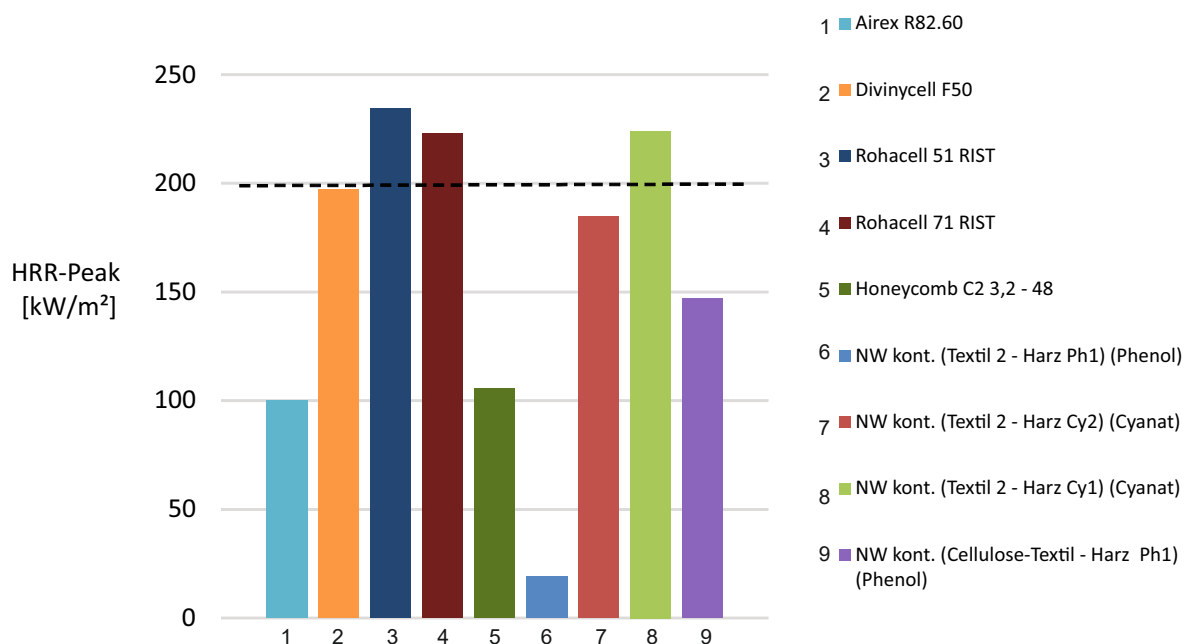


Abb. 7.28: Maximale Wärmefreisetzungsrate der untersuchten Kernmaterialien

Die 200 kW/m^2 wurden von drei Materialkombinationen knapp überschritten. Dabei handelt es sich um die beiden Rohacell®-Schäume sowie die symmetrische Noppenwabe, hergestellt mit dem kommerziell erhältlichen Cyanatharz. Generell lässt sich erkennen, dass die verwendeten Cyanatharze eine höhere Wärmefreisetzung verursachen als das Phenolharz Ph1. Auch bei einer aus Cellulose-Textil (95% Lyocell, 5% Elasthan) hergestellte Noppenwabe mit Harz Ph1 lag der HRR-peak unterhalb 200 kW/m^2 .

Bezüglich der Wärmefreisetzung (THR) wird ein möglichst geringer Wert angestrebt. Erfahrungen aus bisherigen Versuchen zeigen, dass ein Wert von ca. $5 - 6 \text{ MJ/m}^2$ einem Ergebnis in der OSU-Kammer entspricht, welches die Grenzwerte nicht überschreitet. Mit Ausnahme der beiden Rohacell®-Schäume liegen alle Materialien in einem akzeptablen Bereich und überschreiten den Richtwert nur knapp (s. Abbildung 7.29). Klarheit über eine Einhaltung der Grenzwerte kann in diesem Fall nur der nach Norm durchgeführte Test in der OSU-Kammer bringen. Der Rohacell®71-RIST Schaums überschreitet den Richtwert von 6 MJ/m^2 deutlich, fällt jedoch auch wegen der höheren Dichte des Kernmaterials aus der Reihe.

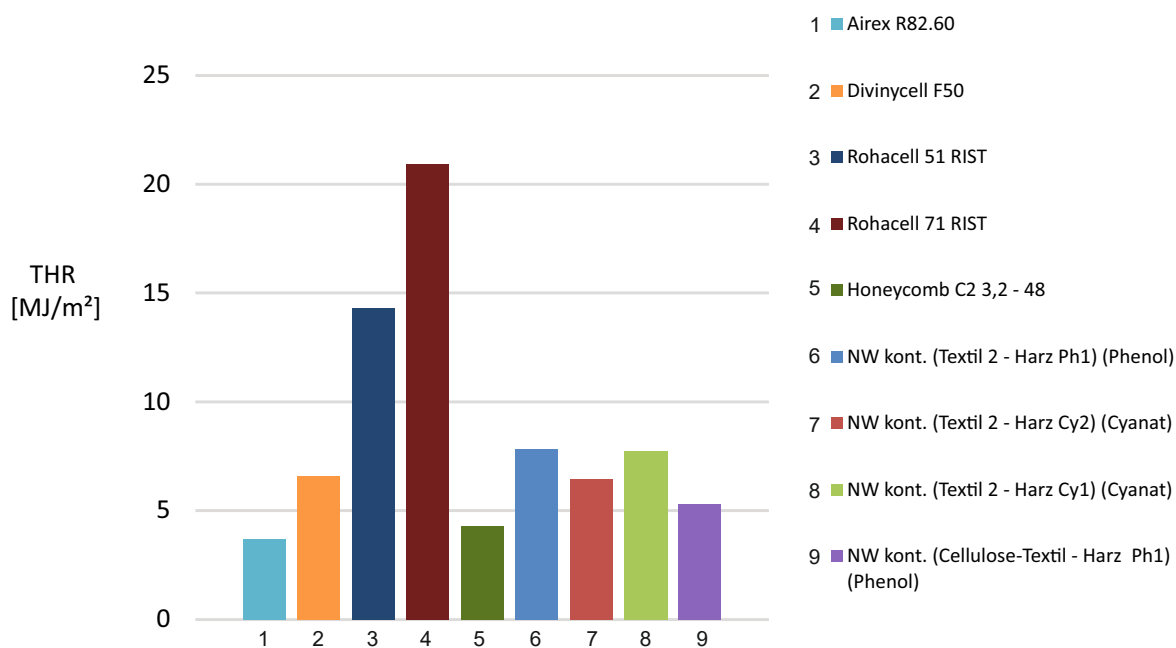


Abb. 7.29: Gesamtwärmefreisetzung der untersuchten Kernmaterialien

Der MARHE-Wert ist in DIN EN 45545-2 als Maximalwert des gleitenden Durchschnitts der Wärmefreisetzungsrate definiert [91]. Die Norm gibt Grenzwerte für den Schienenverkehr vor, der für Fahrzeuge für den Betrieb auf unterirdischen Streckenabschnitten bei 50 kW/m^2 , bzw. für oberirdisch betriebene Fahrzeuge bei 90 kW/m^2 liegt. Wie in Abbildung 7.30 zu sehen ist, werden die 90 kW/m^2 von allen Proben mit Ausnahme der beiden Rohacell®-Schäume unterboten.

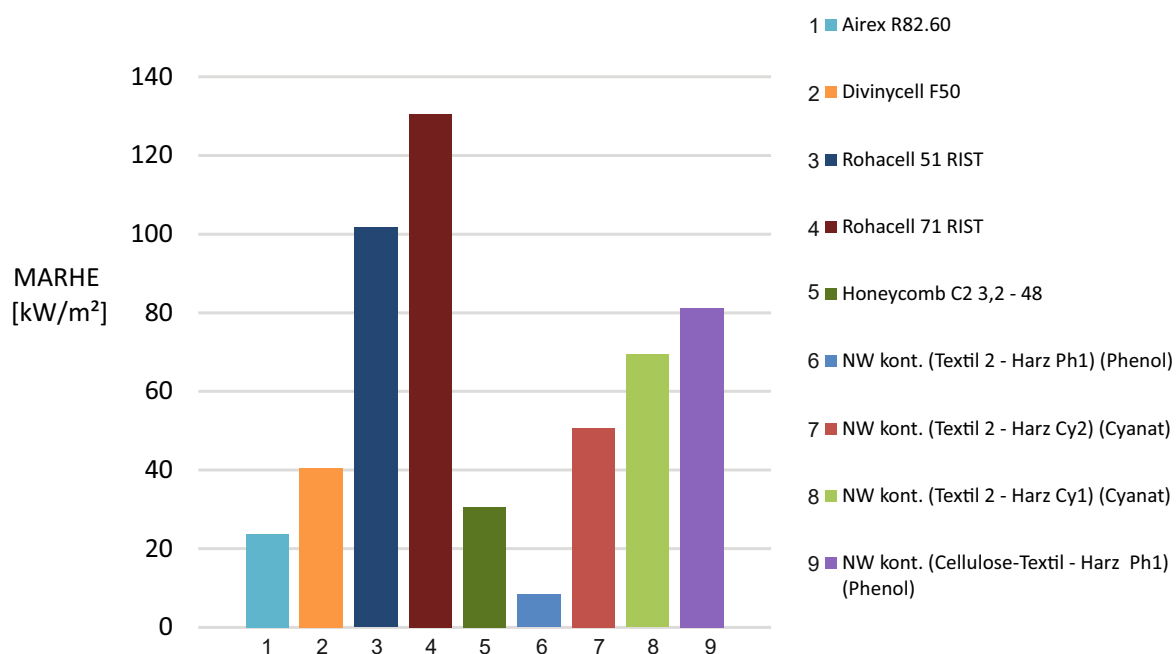


Abb. 7.30: Maximalwert der mittleren Wärmeemission der untersuchten Kernmaterialien

Neben den soeben genannten Kennwerten stellt auch die Gesamtrauchgasfreisetzung (TSR) einen wichtigen Parameter zur Charakterisierung des Brandverhaltens dar. Zur Bestimmung der Rauchfreisetzung wird der Extinktionskoeffizient gemessen, welcher die Schwächung der Intensität I_0 eines Laserstrahls beschreibt, der den Querschnitt des Abzugsrohres durchquert. Die Rauchfreisetzungsrates bei der Verbrennung im Cone-Calorimeter berechnet sich als Produkt aus dem Volumenstrom der Abgase und dem Extinktionskoeffizienten. Das Integral der Rauchfreisetzungsrates, normiert auf die Probenfläche entspricht der Gesamtrauchfreisetzung. Abbildung 7.31 stellt die Gesamtrauchfreisetzung der untersuchten Proben dar.

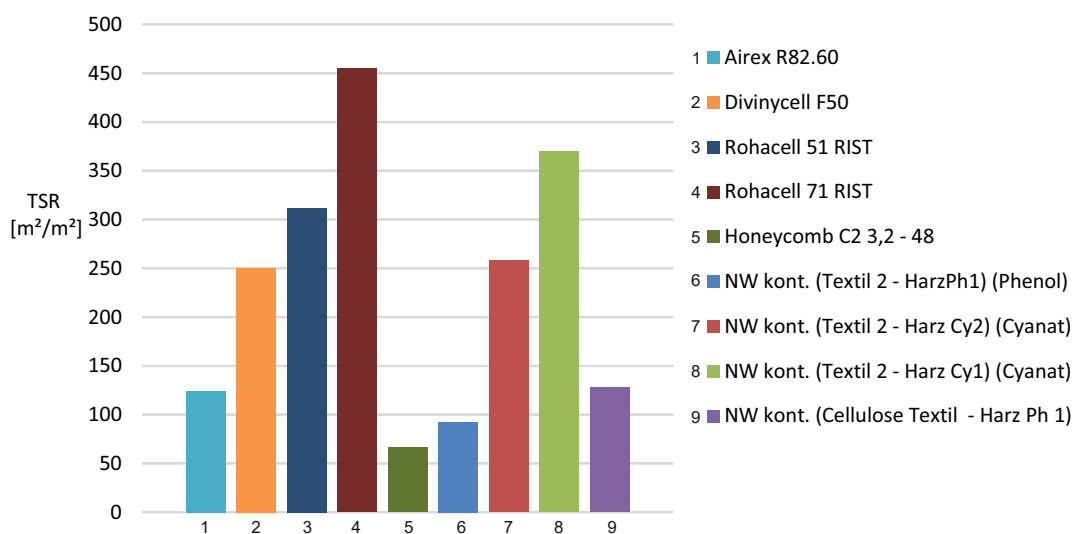


Abb. 7.31: Gesamtrauchfreisetzung der untersuchten Kernmaterialien

Es ist zu erkennen, dass die Honeycomb die geringste Rauchfreisetzung aufweist. Gründe hierfür liegen zum einen im geringsten Bauteilgewicht, da die untersuchte Variante mit einem Raumgewicht von 48 kg/m^3 von allen getesteten Kernmaterialien am leichtesten ist und damit weniger Masse verbrennt. Zum anderen weist das verwendete Phenolharz hervorragende FST-Eigenschaften auf. Dies wird auch bei den untersuchten Noppenwaben, hergestellt mit Textil 2, deutlich. Bei identischem Textil und vergleichbarem Bauteilgewicht verursachen die mit Cyanatharz hergestellten Noppenwaben eine signifikant höhere Rauchentwicklung als die phenolharzbasierten Noppenwaben.

7.4 Herstellung von Funktionsmustern mit symmetrischer Noppenwabe als Kernmaterial

Mit der Pilotanlage hergestellte symmetrische Noppenwaben mit Cyanatharzmatrix wurden von Diehl AirCabin als Kernmaterial für die Herstellung von Funktionsmustern eingesetzt. Bei den Bauteilen handelt es sich um OneFrame Sidewall-Panels (Airbus A320), welche im Crush-Core Verfahren hergestellt werden. Das Sandwichpaket, bestehend aus Kernmaterial und Decklagen wird über einen Spannrahmen ohne Werkzeugkontakt zwischen die obere und untere Werkzeughälfte eingelegt, das Presswerkzeug geschlossen und das Sandwichpaket umgeformt. Die Werkzeugtemperatur liegt während des Vorgangs isotherm bei ca. 160°C .

Da die Bauteildicke kleiner als die ursprüngliche Kerndicke ist, wird durch das Kernmaterial Druck auf die Decklagen aufgebracht, die an die Werkzeugwandung gedrückt werden und die Kontur des Bauteils annehmen. Ein Übermaß des Kernmaterials von mindestens $0,5 \text{ mm}$ ist bei dem verwendeten

Bauteil zwingend erforderlich.

Gegenwärtig wird das Sidewall-Panel in der Serienproduktion mit C1 3,2-29 Honeycombs (C1 Luftfahrtqualität, 3,2 mm Zellweite, 29 kg/m^3) gefertigt. Für das Bauteil mit einer Dicke zwischen 3,2 und 4,6 mm werden Honeycombs mit einer Stärke von 5 mm verwendet. Das Prepreg mit einem Flächengewicht von ca. 500 g/m^2 auf der Sichtseite des Bauteils besteht aus einem Glasfasergewebe mit einem Flächengewicht von ca. 300 g/m^2 , welches mit Phenolharz mit einem Harzgehalt von ca. 40 Ma% imprägniert ist. Rückseitig kommt ein offenporiges phenolharzbasiertes Gitterprepreg zum Einsatz, um den Druck im Wabenkern beim Prozess kontrollieren zu können. Dieses besitzt ebenfalls ein Flächengewicht von ca. 500 g/m^2 und weist einen Harzgehalt von ca. 40 Ma% auf. Das Sandwich wird für 12 min bei 160°C im Werkzeug ausgehärtet [92].

Für die Herstellung der Funktionsmuster wurden die Honeycombs durch cyanatharzbasierter Noppenwaben mit einer Höhe von ca. 5 mm und ein Raumgewicht von ca. 42 kg/m^3 ersetzt. Im Vergleich zum Standardprozess wurde der Verarbeitungsprozess nicht verändert. Sowohl das Referenzbauteil mit Honeycomb-Kern als auch das Funktionsmuster mit Noppenwabenkern sind in Abbildung 7.32 zu sehen.

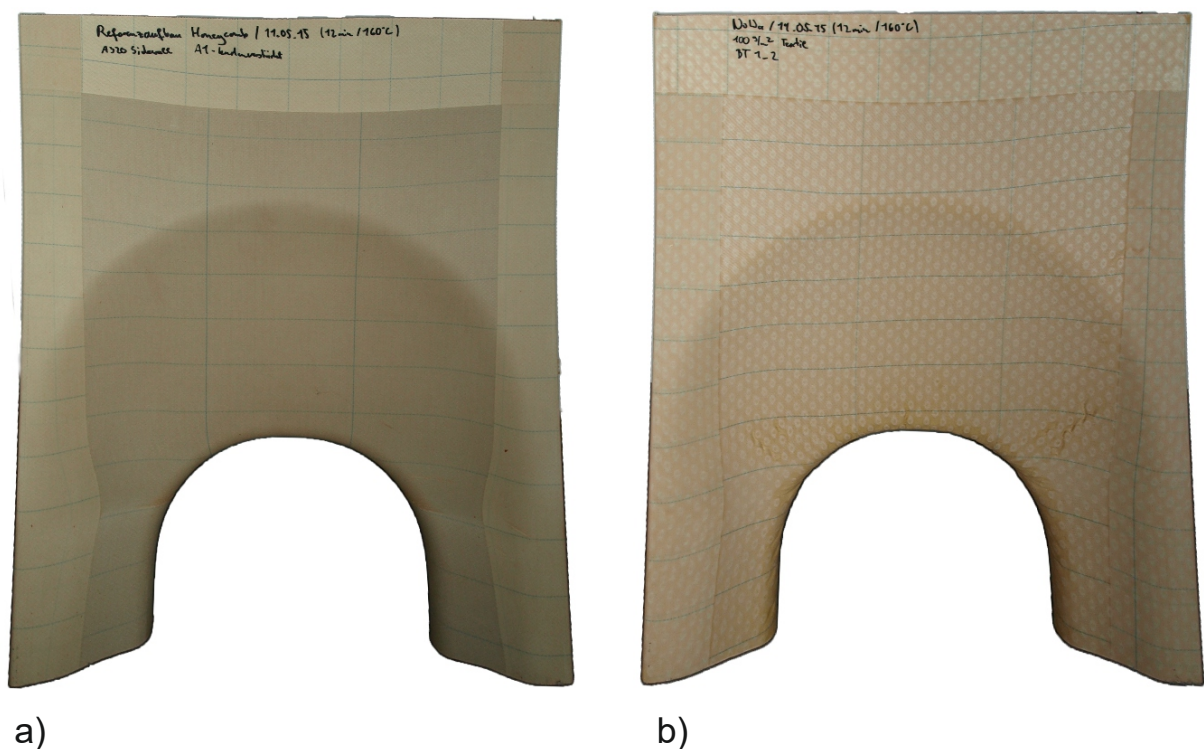


Abb. 7.32: a) Referenzbauteil mit Honeycomb-Kern b) Bauteil mit symmetrischer Noppenwabe als Kernmaterial
(Bauteile von Diehl Aircabin hergestellt)

Wie zu erkennen ist, tritt bei dem Bauteil mit Noppenwabenkern im Bereich des Fenstertrichters stellenweise Faltenbildung in der Decklage auf. Eine mögliche Ursache hierfür ist die Verwendung leicht klebriger Prepregs im Fertigungsprozess. Beim Auflegen der Decklagen auf das Kernmaterial haften diese an den Noppendeckflächen und rutschen schlechter über das Kernmaterial als bei der Honeycomb. Wird das Werkzeug geschlossen und das Sandwichbauteil in seine Form gezwungen, spreizen sich die Noppen im Bereich der Krümmung und ziehen das darauf haftende Prepreg mit. Hierdurch entstehen Spannungen in der unausgehärteten, noch weichen Decklage, die sich in der Ausbildung von Falten und Wellen zwischen den Noppenreihen äußert (siehe Abbildung 7.33).

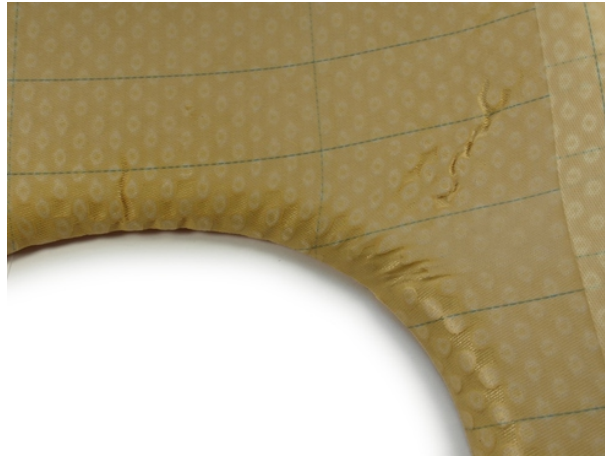


Abb. 7.33: Faltenbildung im Bereich des Fenstertrichters

Noppenwaben mit kleineren und enger stehenden Noppen, wie sie im Rahmen des Vorhabens untersucht wurden, könnten aufgrund der besser verteilten Kontaktflächen zwischen Kernmaterial und Decklage die Oberflächenqualität möglicherweise verbessern. Die begrenzte Noppenhöhe, das deutlich aufwändiger zu fertigende Werkzeug und die schwierigere Entformung des Kernmaterials stellen allerdings Nachteile einer solchen Geometrie dar.

Um die Oberflächenqualität bei stark gekrümmten Bauteilen zu verbessern, lässt sich möglicherweise auch beim Fertigungsverfahren oder bei der Auswahl der Decklagen ansetzen. Hier wäre zu prüfen, inwiefern sich Decklagen mit geringerem Tack (Klebrigkeit) und weniger Harzfluss auf die Bauteiloberfläche auswirken.

Sieht man von den kritischen Stellen im Bereich des Fenstertrichters ab, weist das Funktionsmuster in den weniger gekrümmten Bereichen eine nahezu vergleichbare Oberflächenqualität wie das Referenzbauteil mit Honeycombkern auf. Die Noppenstruktur ist zwar durch die Decklagen hindurch sichtbar, der Telegraphing Effekt ist bei den verwendeten Decklagen in Kombination mit dem Crush-Core-Verfahren jedoch minimal, sodass sich die Noppenstruktur kaum auf der Oberfläche abzeichnet. Dies ist ein wichtiges Kriterium für den Einsatz der üblicherweise verwendeten Dekorfolien.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden textile Noppenwaben zur Verwendung als Kernmaterial in leichten, brandfesten Sandwichstrukturen weiter entwickelt. Textile Noppenwaben bestehen aus einer flächigen, mit Harz imprägnierten Maschenware, welche in einem ersten Schritt zur dreidimensionalen Noppenstruktur geformt und anschließend durch Härtung des Harzes stabilisiert wird. Zahlreiche Freiheitsgrade bei der Wahl des Textilmaterials sowie der Noppenanordnung und -geometrie erlauben es dabei, die Noppenwaben für vielfältige Anwendungen gezielt anzupassen.

Aufbauend auf der etablierten einseitigen Noppengeometrie, wurden grundsätzliche Überlegungen zur Optimierung des Kernmaterials angestellt. Der Wechsel zu einer symmetrischen Noppengeometrie und die damit verbundene Verlagerung der Biegeachse in die Mittelebene der Noppenwabe, bringt nicht nur große Vorteile in puncto Drapierbarkeit über mehrfach gekrümmte Flächen, sondern führt aufgrund der kleineren Kontaktfläche zwischen imprägniertem Textil und formgebendem Werkzeug auch zu einem deutlich verbesserten Entformungsverhalten, nach der Aushärtung des Kernmaterials. In einer allgemeinen Betrachtung der Textilverformung bei unterschiedlichen Noppengeometrien und -anordnungen wurde zudem deutlich, dass das Textil bei der Formgebung zur symmetrischen Noppe weniger gedehnt wird als bei vergleichbaren Konfigurationen der einseitigen Noppenwabe. Die bessere Textilausnutzung ermöglicht es, bei identischem Textil, durch die Wahl einer symmetrischen Noppengeometrie höhere Noppenwaben herzustellen, als dies bei der einseitigen Geometrie der Fall ist.

Ein wesentlicher Nachteil der Noppenwaben bestand bislang in der diskontinuierlichen und zeitaufwändigen Fertigung mit zahlreichen manuellen Arbeitsschritten. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte dieser Nachteil durch die Entwicklung eines kontinuierlichen, automatisierten Fertigungsverfahrens und die erfolgreiche Inbetriebnahme einer Versuchsanlage im Labormaßstab sowie einer deutlich größeren und schnelleren Pilotanlage zur Herstellung dieses innovativen Kernmaterials eliminiert werden. Das zusammen mit der InnoMat GmbH entwickelte und in dieser Arbeit dargestellte „Verfahren zur Endlosfertigung neuartiger Kernwerkstoffe für Leichtbauanwendungen“ wurde beim AVK-Innovationspreis 2014 mit dem 2. Platz in der Kategorie „Prozesse und Verfahren“ ausgezeichnet.

Kontinuierlich auf der Versuchsanlage hergestellte, symmetrische Noppenwaben sowie diskontinuierlich hergestellte, einseitige Noppenwaben wurden hinsichtlich Schub-, Druck- und Biegefestigkeit sowie der Anbindung an die Decklagen mit luftfahrtzertifizierten Schäumen (Airex® R82.60, Divinycell F50, Rohacell® 51RIST, Rohacell® 71RIST) und Honeycombs (CORMASTER C1 3,2-29 und C2 3,2-48) verglichen. Dabei zeigte sich, dass beide Varianten der Noppenwabe hinsichtlich der Schub- und Biegefestigkeit hinter den Vergleichsmaterialien zurück bleiben und in puncto Druckfestigkeit in etwa auf dem Niveau des kommerziell erhältlichen Schaums Airex® R82.60 liegen.

Im Vergleich zu den übrigen getesteten Materialien bieten Noppenwaben jedoch neben geringeren Herstellungskosten eine deutlich bessere Drapierbarkeit und aufgrund der offenen Struktur die Möglichkeit der Drainierbarkeit sowie der Funktionsintegration durch das Einbringen von Kabeln oder Leitungen in das Sandwichbauteil. Für den anvisierten Einsatzbereich, brandfester, nichttragender

Verkleidungselemente im Flugzeug-Interior-Bereich, bei dem die mechanischen Eigenschaften des Kernmaterials nur eine untergeordnete Rolle spielen, können die Vorteile der Noppenwabe sinnvoll genutzt werden.

Ergänzend zu den genannten mechanischen Untersuchungen wurden symmetrische Noppenwaben hinsichtlich ihres Impact-Verhaltens mit Honeycombs verglichen. Dabei zeigten Sandwichproben mit Noppenkern eine deutlich größere Toleranz gegenüber Impact-Belastung als die Referenzproben mit Honeycombs als Kernmaterial. So wurde die Decklage bei Proben mit symmetrischer Noppenwabe als Kernmaterial erst bei deutlich höheren Lasten durchstoßen als dies bei Proben mit Honeycomb-Kern der Fall war.

Neben der umfassenden mechanischen Charakterisierung, wurden kontinuierlich hergestellte, symmetrische Noppenwaben im Cone-Kalorimeter bezüglich ihres Brandverhaltens untersucht und wesentliche FST-Parameter bestimmt. Wie auch bei den mechanischen Untersuchungen wurden Sandwichproben mit etablierten Kernmaterialien zum Vergleich herangezogen. Sandwiches mit textilem Noppenwabekern und Phenolharzmatrix zeigten dabei sehr gute FST-Eigenschaften und sind voraussichtlich in der Lage, die für den Einsatz in Verkehrsflugzeugen erforderlichen Kriterien der Norm FAR/JAR 25853 [8] zu erfüllen.

Die im Rahmen der Arbeit aufgebaute Pilotanlage zur kontinuierlichen Herstellung textiler Noppenwaben ist in der Lage, das Kernmaterial in einer Bahnbreite von 800 mm als Endlosware zu fertigen. Im Vergleich zum bisherigen diskontinuierlichen Fertigungsverfahren kann durch ihren Einsatz die Produktivität deutlich erhöht werden. Ausgehend von der bisher bei der Fraunhofer PYCO verwendeten Presse mit einer Fläche von $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ und einer Taktzeit von 40 min für die Herstellung einer Noppenwaben-Platte wurde bisher eine Fertigungskapazität von $0,375 \text{ m}^2/\text{h}$ an Noppenwaben erreicht. Mit dem kommerziell erhältlichen „Eponol 0639 V C2“ und einer Anlagengeschwindigkeit von 1 m/min konnte dieser Wert an der Pilotanlage auf $48 \text{ m}^2/\text{h}$ signifikant erhöht werden. Durch den Einsatz reaktiverer Harzsysteme ließe sich die Fertigungskapazität in Zukunft noch weiter steigern.

Erstmals konnte in einem effizienten und kontinuierlichen Verfahren die komplette Prozesskette von der Imprägnierung der textilen Maschenware bis hin zur Formgebung und Aushärtung zur Noppenwabe in einer Fertigungslinie vereint werden. Damit ist es nun möglich, brandfeste Noppenwaben in größeren Mengen zu fertigen und interessierten Unternehmen dieses innovative Kernmaterial für Testzwecke zur Verfügung zu stellen. Weiterer Entwicklungsbedarf besteht nun in der Optimierung der Anlagentechnik, um Spannungen in der Textilzuführung zu reduzieren und die Höhe des Kernmaterials zu steigern. Die an der Versuchsanlage gefertigten Noppenhöhen konnten bislang an der Pilotanlage noch nicht hergestellt werden.

Erstrebenswert sind darüber hinaus weitere Untersuchungen in Bezug auf Noppengeometrie und Anordnung. So wurde beispielsweise die Fertigung von Noppenwaben mit unterschiedlichen Noppenhöhen über die Breite der Noppenbahn im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht, wenngleich der Herstellungsprozess hierfür im Wesentlichen identisch ist. Zur Herstellung von Noppenwaben mit einem definierten Höhenprofil müssen die Werkzeuge dementsprechend verändert werden, dass die Zylinderstifte unterschiedlich tief ineinander eingreifen. Auf diese Weise wäre es z.B. möglich, durch das Weglassen von Zylinderstiften Noppenwaben mit integrierten Kanälen zur Integration größerer Leitungsquerschnitte herzustellen.

Außerhalb der vorliegenden Arbeit durchgeführte Untersuchungen zeigen, dass einseitige Noppenwaben Schall im Frequenzspektrum von 3150 Hz bis 10000 Hz deutlich besser dämmen als Honeycombs [43]. Im Flugzeug-Interior-Bereich ergibt sich dadurch die Möglichkeit, durch den Einsatz von Sandwichbauteilen mit Noppenwabenkern die Schalldämmung der Flugzeug-Kabine im hohen Frequenzbereich deutlich zu verbessern. Forschungen zum akustischen Verhalten von Noppenwaben stehen jedoch noch am Anfang und weitere Arbeiten sind notwendig, um verschiedene Varianten von Noppenwaben akustisch zu charakterisieren und ggf. zu optimieren. Die schalldämmenden Eigenschaften textiler Noppenwaben können dann in Zukunft möglicherweise in weiteren Anwendungen außerhalb der Flugzeugkabine sinnvoll genutzt werden.

Literatur

- [1] Klein, B.: *Leichtbau Konstruktion*. 10. Aufl. Springer Vieweg, 2013, S. 192–197.
- [2] Bauer, M. und Uhlig, C.: „Bauelement, insbesondere Wandverkleidung und Verfahren zu dessen Herstellung“. Patent EP1831009B1. Mai 2009.
- [3] Bauer, M. und Kahle, O.: *Harzentwicklung und Weiterentwicklung der Noppenwabe - Schnelle Prepreg-Systeme (Förderkennzeichen 03WKP06A)*. Projektabschlussbericht. 2012.
- [4] Bauer, M., Friede, P. und Uhlig, C.: „Sandwiches mit Noppenwabenkern“. In: *Kunststoffe* Nr.8 (2008), S. 95–97.
- [5] Bernaschek, A.: „A three-dimensional core material for lightweight sandwich construction“. In: *Composite Solutions* 1 (2012), S. 12.
- [6] Bernaschek, A.: „Textile Noppenstruktur statt Honigwaben“. In: *Maschinenmarkt Onlineausgabe* Juli (2013).
- [7] Black, S.: „Advanced materials for aircraft interiors“. In: *High-Performance Composites* November (2006).
- [8] *Aeronautics and Space - Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes*. Federal Airways Regulation (FAR). URL: http://www.faa.gov/regulations_policies/advisory_circulars/index.cfm/go/document.list/parenttopicid/105 (besucht am 15.07.2015).
- [9] Wong, R.: „Sandwich construction in the starship“. In: *37th International SAMPE Symposium and Exhibition*. Anaheim. Ca. USA. 9-12. März 1992, S. 186–197.
- [10] Vahilov, V. et al: „Detecting water in aviation honeycomb structures using transient IR-thermographic NDT“. In: *Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering*. Bd. 5073, ThermoSense XXV Silver Anniversary Meeting. Orlando. Fl. USA. 22-24. Apr. 2003, S. 345–355.
- [11] Zenkert, D., Hrsg.: *The Handbook of Sandwich Construction*. 1. Aufl. EMAS Publishing, 1997, S. 3.
- [12] Klein, B.: *Leichtbau Konstruktion*. 10. Aufl. Springer Vieweg, 2013, S. 76–80.
- [13] Hexcel Composites: *Hexweb™ Honeycomb Sandwich Design Technology*. URL: http://hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets/Honeycomb_Sandwich_Design_Technology.pdf (besucht am 16.06.2014).
- [14] *Aircraft Materials Fire Test Handbook*. Federal Aviation Administration. URL: <http://www.fire.tc.faa.gov/handbook.stm> (besucht am 13.07.2014).
- [15] Zenkert, D., Hrsg.: *The Handbook of Sandwich Construction*. 1. Aufl. EMAS Publishing, 1997, S. 23.
- [16] Silva, A. D. und Kyriakides, S.: „Compressive response and failure of balsa wood“. In: *International Journal of Solids and Structures* 44 (2007), S. 8685–8717.
- [17] Kepler, J.: „Simple stiffness tailoring of balsa sandwich core material“. In: *Composites Science and Technology* 71 (2011), S. 46–51.
- [18] *BALTEK® Balsa SB Materialdatenblatt DE 2012 V01*. Baltek Inc. 2012.
- [19] Cherif, C., Hrsg.: *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*. 1. Aufl. Springer Verlag, 2011, S. 215.

- [20] Biancolini, M.: „Evaluation of equivalent stiffness properties of corrugated board“. In: *Composite Structures* 69 (2004), S. 322–328.
- [21] *Aluminium Corrugated Panel*. Alustrong Group Co., Limited. URL: <http://www.alustrong.com/products/118-Aluminum-corrugated-panel-Corrugated-aluminum-panel.html> (besucht am 14.03.2012).
- [22] Fischer, S., Heimbs, S. und Kilchert, S.: „Sandwich structures with folded core: Manufacturing and mechanical behavior“. In: *SAMPE Europe 30th*. Paris, Frankreich. März 2009, S. 256–263.
- [23] Klett, Y.: „Auslegung multifunktionaler isometrischer Faltstrukturen für den technischen Einsatz“. Dissertation. Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart, 2013.
- [24] Wicks, N. und Hutchinson, J.: „Performance of sandwich plates with truss cores“. In: *Mechanics of Materials* 36 (2004), S. 739–751.
- [25] Zhang, G., Ma, L. und Wang, B.: „Mechanical behavior of CFRP sandwich structures with tetrahedral lattice truss cores“. In: *Composites: Part B* 43 (2012), S. 471–476.
- [26] Sun, Y. und Gao, L.: „Structural responses of all-composite improved-pyramidal truss sandwich cores“. In: *Materials and Design* 43 (2013), S. 50–58.
- [27] Haydn, N. und Wadley, G.: „Multifunctional periodic cellular metals“. In: *Philosophical transactions of the royal society A* 364 (2006), S. 31–68.
- [28] Xiong, J., Ma, L. und Wu, L.: „Mechanical behavior and failure of composite pyramidal truss core sandwich columns“. In: *Composites: Part B* 42, Issue 4 (2011), S. 938–945.
- [29] Tubus Bauer. URL: <http://www.tubus-bauer.com/technology.html> (besucht am 06.08.2013).
- [30] Bitzer, T.: *Honeycomb Technology - Materials, design, manufacturing, applications and testing*. 1. Aufl. Chapman und Hall, 1997, S. 19.
- [31] Bitzer, T.: *Honeycomb Technology - Materials, design, manufacturing, applications and testing*. 1. Aufl. Chapman und Hall, 1997, S. 79.
- [32] Epstein, G. und Ruth, S.: *Honeycomb Sandwich Structures: Vented versus unvented designs for space systems*. 1993.
- [33] Zhang, J. und Ashby, M.: „The out-of-plane properties of honeycombs“. In: *International Journal of Mechanical Sciences* 34, Issue 6 (1992), S. 475–489.
- [34] Bernaschek, A. und Gerber, N.: *AP 1: Konzeption und Spezifikation für die Noppenwabe und daraus hergestellte Sandwichstrukturen - Recherche und Marktüberblick zur kommerziellen Verfügbarkeit von Konkurrenzprodukten*. Internes Dokument. 2012.
- [35] Bitzer, T.: *Honeycomb Technology - Materials, design, manufacturing, applications and testing*. 1. Aufl. Chapman und Hall, 1997, S. 10–13.
- [36] *Datenblatt - NidaFusion STO*. NidaCore. 2012.
- [37] L&L Products: *L&L Reinforce - Aircraft Panel Reinforcement*. 2014.
- [38] *Making aircraft interiors lighter, stronger, quieter*. L&L Products. 2014.
- [39] *DIN 7226 - Schaumstoffe - Begriffe und Einteilung*. Deutsches Institut für Normung. 1982.
- [40] *Datenblatt - Airex R82*. Gaugler & Lutz OHG. 2012.
- [41] *Technical Data - Divinycell F*. DIAB. 2011.
- [42] *Product Information - Rohacell® RIST*. Evonik Industries. 2011.
- [43] Ischdonat, N. et al.: „Possibilities and chances for integration of functionalities into cabin lining components based on sandwich panels with polycyanurate matrix and nap-cores“. In: *AST 2015 Workshop on Aircraft System Technologies*. Hamburg, Deutschland. Feb. 2015, S. 325–334.

- [44] Zenkert, D., Hrsg.: *The Handbook of Sandwich Construction*. 1. EMAS Publishing, 1997, S. 130.
- [45] Keith, D.: „Genopptes Flachmaterial sowie Verfahren und Vorrichtung für seine Herstellung“. Patent DE2258513B2. Juni 1973.
- [46] Disselbeck, D.: „Flächenförmiger Sandwichformkörper“. Patent EP0158234B1. Juni 1990.
- [47] Gebauer, E., Blaschke, K. und Mildenerberger, H.: „Formable textile sheet material and network materials produced therefrom“. Patent US5158821. Okt. 1992.
- [48] Disselbeck, D. und Gebauer, E.: „Manufacture of a three-dimensionally shaped textile material and use thereof“. Patent US5364686. Nov. 1994.
- [49] Disselbeck, D. und Stahl, D.: „Sheet-like sandwich molding“. Patent US4631211. Dez. 1986.
- [50] Brüning, H. und Eichnauer, D.: „Verfahren zu Herstellung eines dreidimensional verformten Netzwerkstoffes, Netzwerkstoff, sowie Verwendung dieses Netzwerkstoffes“. Patent DE19721370A1. Nov. 1998.
- [51] Disselbeck, D. und Gebauer, E.: „Verfahren zur Herstellung eines dreidimensional verformten Textilmaterials und seine Verwendung“. Patent EP0523431B1. Nov. 1992.
- [52] Weber, P. und Stallmann, K.: „Verfahren zur Herstellung eines dreidimensional verformten, beharzten Textilmaterials und seine Verwendung“. Patent EP0385432B1. Juli 1994.
- [53] Klecka, M. und Schetter, R.: „Textiles Flächenmaterial“. Patent EP0324714B1. Feb. 1996.
- [54] Irbit Research + Consulting AG: „Method and apparatus for manufacturing dimpled structures from elastic cloth“. Patent EP0480140A2. Apr. 1992.
- [55] Rust, H.: „Noppenwalze für die Herstellung von Noppenbahnen“. Patent DE10012418A1. Sep. 2001.
- [56] Wolf, P.: „Wetterfeste Tischtennisplatte sowie Verfahren und Vorrichtung zu ihrer Herstellung“. Patent DE3139222A1. März 1983.
- [57] *Polyester-Netzwerkstoff, thermoverformt*. Materialarchiv. URL: www.materialarchiv.ch/detail/1595 (besucht am 17. 07. 2015).
- [58] Cherif, C., Hrsg.: *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*. 1. Aufl. Springer Verlag, 2011, S. 86.
- [59] *DIN 60 000 - Textilien Grundbegriffe*. Deutsches Institut für Normung. 1969.
- [60] Cherif, C., Hrsg.: *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*. 1. Aufl. Springer Verlag, 2011, S. 265–275.
- [61] Gries, T., Veit, D. und Wulfhorst, B.: *Textile Fertigungsverfahren - Eine Einführung*. 2. Aufl. Hanser Verlag, 2014, S. 169.
- [62] Cherif, C., Hrsg.: *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*. 1. Aufl. Springer Verlag, 2011, S. 20.
- [63] *DIN 62 050 - Gewirke und Gestricke*. Deutsches Institut für Normung. 1990.
- [64] Cherif, C., Hrsg.: *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*. 1. Aufl. Springer Verlag, 2011, S. 227–236.
- [65] *DIN EN ISO 4287 - Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit*. Deutsches Institut für Normung. 2009.
- [66] Bauer, M. und Kahle, O.: *Harzentwicklung und Weiterentwicklung der Noppenwabe - Schnelle Prepreg-Systeme (Förderkennzeichen 03WKP06A)*. Projektabschlussbericht. 2012, S. 30–38.
- [67] Habenicht, G.: *Kleben - Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. 6. Springer Verlag, 2008, S. 343.

- [68] LA Rubber Group: *The General Chemical Resistance of Various Elastomers*. Los Angeles Rubber Group, 1970.
- [69] HART-COAT® - *Funktionelle Veredelungen von Aluminium-Werkstoffen*. AHC Oberflächentechnik. URL: https://www.ahc-surface.com/pdf-downloads/Verfahren%20Deutsch/HC-2011_dt_ansicht.pdf (besucht am 25.07.2012).
- [70] DURNI-COAT® - *Funktionelle Veredelungen von Metallen und Kunststoffen*. AHC Oberflächentechnik. (Besucht am 25.07.2012).
- [71] *Funktionelle Lackiertechnik - Gleit- und Spezialbeschichtungen*. AHC Oberflächentechnik. (Besucht am 25.07.2012).
- [72] *Technische Auslegung der Förderkette*. Karl Jungbluth Kettenfabrik GmbH und Co. KG. URL: <http://www.jungbluth-ketten.de/downloads/Technik/Technische%20Auslegung.pdf> (besucht am 17.05.2014).
- [73] Schaeffler KG: *Wälzlager*. Schaeffler KG, 2006, S. 34.
- [74] Fraunhofer Gesellschaft: *Vorkalkulierte Stundensätze und Zuschläge Basisjahr 2016*. Internes Dokument. 2016.
- [75] SCHÜTZ GmbH & Co. KGaA: *Persönliche e-mail vom 02.03.2016*. e-mail. 2016.
- [76] CORMASTER C2 - *Maximale Leistung für industrielle Anwendungen mit Leichtbauwerkstoffen von SCHÜTZ*. SCHÜTZ GmbH & Co. KGaA. 2015.
- [77] *Datenblatt - EPONOL®Resin 0639 VC 2*. Momentive Specialty Chemicals. 2011.
- [78] Hamerton, I., Hrsg.: *Chemistry and technology of cyanate ester resins*. 1. Aufl. Blackie Academic & Professional, 1994.
- [79] Bauer, M. und Bauer, J.: *Chemistry and technology of cyanate ester resins*. Hrsg. von Ian Hamerton. 1. Blackie Academic & Professional, 1994. Kap. Aspects of the kinetics, modelling and simulation of network build-up during cyanate ester cure, S. 334.
- [80] Söthje, D.: „Recycling- und reparaturfähige Duromer-matrizes für Hochleistungsfaserverbund-kunststoffe auf Basis der Polycyanurate“. Dissertation. Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg, 2015.
- [81] *DIN 53291 - Prüfung von Kernverbunden - Druckprüfung senkrecht zur Deckschichtebene*. Deutsches Institut für Normung. 1982.
- [82] *DIN 53294 - Prüfung von Kernverbunden - Schubversuch*. Deutsches Institut für Normung. 1982.
- [83] *DIN 53 295 - Trommel Schälversuch*. Deutsches Institut für Normung. 1982.
- [84] Bernaschek, A., Chowdhury, Y. und Kahle, O.: „(Poster) - Nap Core - Core Material for Sandwich Construction“. In: *Thermosets*. Berlin, Germany. Sep. 2011, S. 195.
- [85] Sjöblom, P., Hartness, J. und Cordell, T.: „On low velocity Impact Testing of Composite Materials“. In: *Journal of Composite Materials* 22.1 (1988), S. 30–52.
- [86] Cantwell, W. und J., M.: „The impact resistance of composite materials - a review“. In: *Composites* 22(5) (1991), S. 347–362.
- [87] Bauer, M. und Kahle, O.: *Harzentwicklung und Weiterentwicklung der Noppenwabe - Schnelle Prepreg-Systeme (Förderkennzeichen 03WKP06A)*. Projektabschlussbericht. 2012, S. 45.
- [88] Schubel, P., Luo, J. und Daniel, I.: „Low velocity impact behavior of composite sandwich panels“. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 36 (10 2005), S. 1389–1396.
- [89] *DIN 5660-1 Prüfungen zum Brandverhalten von Baustoffen - Wärmefreisetzungs-, Rauchentwicklungs- und Masseverluste - Teil 1: Wärmefreisetzungsrate (Cone Calorimeter-Verfahren) und Rauchentwicklungsrate (dynamische Messung)*. Deutsches Institut für Normung. 2015.

-
- [90] Grand, A. E., Hrsg.: *Fire Standards in the international marketplace STP 1163*. American Society for Testing und Materials, 1995.
 - [91] *DIN 45545-2 Bahnanwendungen - Brandschutz in Schienenfahrzeugen - Teil 2: Anforderungen an das Brandverhalten von Materialien und Komponenten*. Deutsches Institut für Normung. 2013.
 - [92] Steinmayer, M.: *Persönliche e-mail vom 29.02.2016*.

Abbildungsverzeichnis

4.1	Kräfte am geraden Balken (eigene Darstellung nach [12])	5
4.2	Zur Ableitung der Flächenmomente auf Schwerpunkt- bzw. kartesisches Bezugssystem (eigene Darstellung nach [12])	6
4.3	Doppel-T-Träger aus drei zusammengesetzten Profilquerschnitten	7
4.4	Biegebeanspruchtes Sandwichelement mit bezogener Breite $b=1$ (eigene Abbildung nach [1])	8
4.5	Auf das Vollmaterial bezogene mechanische Kennwerte und Gewichte von Sandwichstrukturen (eigene Darstellung nach [13])	9
4.6	Schubbeanspruchung durch Querkraftbiegung	10
4.7	Sandwichelement unter kritischem Schub mit bezogener Breite $b=1$ (eigene Darstellung nach [1])	
	a) Belastungs- und Beanspruchungszustand	
	b) Verzerrungszustand	10
4.8	Balsaholz als Kernmaterial	13
4.9	Abstandsgewebe als Kernmaterial	14
4.10	Wellkern als Kernmaterial (Bauteile mit freundlicher Unterstützung von der InnoMat GmbH zur Verfügung gestellt)	15
4.11	Falten des flachen Ausgangsmaterials in eine dreidimensionale Faltwabe (Quelle: Foldcore GmbH)	16
4.12	Faltwabe als Kernmaterial (Quelle: Foldcore GmbH)	16
4.13	Fachwerkkerne mit verschiedenen Fachwerkstrukturen (eigene Darstellung nach [27])	17
4.14	a) Pyramidaler CFK-Fachwerkkern b) Sandwich mit pyramidalem CFK-Fachwerkkern (Quelle: Composites Part B [28])	17
4.15	Tubuswabe als Kernmaterial	18
4.16	Honeycomb aus Nomex® -Papier	19
4.17	Verschiedene Zellstrukturen der Honeycomb (eigene Darstellung nach [30])	19
4.18	Zellweite D der Honeycomb	20
4.19	Sich ausbildende Sattelform bei zylindrischer Krümmung der Honeycomb	20
4.20	links: Überexpandierte Honeycomb in gekrümmter Form	
	rechts: Klassische Honeycomb lässt sich nicht ohne Beschädigung krümmen	21
4.21	Druckfestigkeit verschiedener Aluminium-Honeycombs bei gleicher Zellweite $1/4''$ (6,4 mm) in Abhängigkeit vom Raumgewicht (Quelle: InnoMat GmbH [34])	21
4.22	Druckfestigkeit verschiedener Nomex®-Honeycombs in Abhängigkeit vom Raumgewicht (Quelle: InnoMat GmbH [34])	22
4.23	Druckfestigkeiten in Abhängigkeit vom Raumgewicht von Al- und Nomex®-Honeycombs im Vergleich (Quelle: InnoMat GmbH [34])	22
4.24	Schematischer Herstellungsprozess von Nomex®-Honeycombs (eigene Darstellung nach [35])	23
4.25	Honeycomb mit eingebrachter Verstärkung im Randbereich eines Panels (Teil eines Airbus A320 - DADO-Panels)	24
4.26	Schaumkern als Kernmaterial	25
4.27	Kontaktflächen eines Kerns mit Hohlformelementen zu den Decklagen auf Ober- (links) und Unterseite (rechts)	26
4.28	Ineinander gesteckte Noppenwaben	26

4.29 Die gezeigte Struktur bietet die Möglichkeit, Kabel oder andere Leitungen im Sandwich zu verlegen	27
4.30 a) Festigkeitsversagen einer Deckschicht oder beider Deckschichten b) Schubversagen im Kern c) Eindellen der Decklage aufgrund von Biegung d) Ablösen der Decklage e) globales Ausbeulen f) Schubbeulen g) lokales Beulen h) Eindellen der Decklage aufgrund lokalen Drucks (eigene Darstellung nach [44])	28
4.31 Werkzeuge und genopptes Material (Quelle: Patent DE2258513A1 [45])	29
4.32 Werkzeugpaar und damit hergestellte Noppenstruktur (eigene Darstellung nach [54])	30
4.33 Positiv- und Negativwerkzeug zur Herstellung der Noppenwabe (dreieckige Anordnung)	31
4.34 Entformen einer ausgehärteten Noppenwabe (Quelle: InnoMat GmbH)	32
4.35 Kontinuierliches Verfahren zur Strukturierung thermoplastischer Folien (eigene Darstellung nach [45])	33
4.36 Kontinuierliches Verfahren zur Herstellung einer wetterfesten Tischtennisplatte (eigene Darstellung nach [56])	34
4.37 Kommerziell erhältliches technisches 3-D Textil aus dem Hause Mayser GmbH & Co. KG	34
4.38 Einteilung der maschenbildenden Maschinen (eigene Darstellung nach [61])	35
4.39 Einteilung textiler Gebilde (eigene Darstellung nach [62])	36
4.40 Beispiele für Maschenbilder gewirkter Textilien ((Rechts-Links = RL) RL-Franse, RL-Trikot, RL-Tuch) (eigene Darstellung nach [60])	37
4.41 Bestandteile einer Masche und Maschengometrie (eigene Darstellung nach [64])	37
4.42 links: Rechte Maschenseite (Maschenschenkel obenliegend) rechts: Linke Maschenseite (Kopf- und Fußbogen obenliegend) eines Rechts-Links-Gestricks (eigene Darstellung nach [64])	38
4.43 Seitenansicht, Frontansicht und Draufsicht auf single- und double-jersey-Gestrick links: RL-Gestrick (single jersey) rechts: RR-Gestrick (double jersey) (eigene Darstellung nach [64])	38
4.44 Noppenwabe mit einseitig ausgebildeten Noppen links: quadratische Anordnung rechts: dreieckige Anordnung	39
4.45 Drapierte Noppenwabenzuschnitte zur Realisierung mehrfach gekrümmter Flächen (dreieckige Noppenanordnung) (Quelle: Diehl Aircabin)	39
4.46 Linienbildung bei regelmäßiger Noppenanordnung (links: Dreieckig rechts: Quadratisch)	40
4.47 Telegraphing auf der Ober- und Unterseite eines Panels mit Noppenwabe als Kernmaterial	40
4.48 Darstellung der Oberflächentopographie links: Sandwichpanel mit Honeycomb-Kern (Zellweite 3,2 mm / Messbereich 70x70 mm ²) rechts: Sandwichpanel mit Noppenwabenkern (10 mm Noppendurchmesser / Messbereich 40x40 mm ²)	41
5.1 Biegeachsen bei einseitiger und symmetrischer Noppengeometrie	42
5.2 Werkzeugpaar zur Herstellung symmetrischer Noppenwaben	43
5.3 Sphärisch gewölbte Noppenwabe	43
5.4 Kontaktflächen zwischen Textil und Werkzeug bei unterschiedlichen Noppengeometrien links: symmetrische Noppenwabe rechts: einseitige Noppenwabe	44
5.5 Kontaktflächen zwischen Textil und Werkzeug bei unterschiedlichen Werkzeuggeometrien links: Positivwerkzeug rechts: Negativwerkzeug	44

5.6	Geometrie des Positiv-Werkzeugs mit 6 mm-Zylinderstiften zur Herstellung von Noppenwaben	46
5.7	Vergleich der beiden Werkzeugpaare mit 6 mm und 3 mm-Zylinderstiften	46
5.8	Sandwichplatte mit Noppenwabe und Honeycomb als Kernmaterial (Beschädigte Noppenwaben durch das Abfräsen der Honeycombs)	47
5.9	Einseitige Noppenwabe bei 50-facher Vergrößerung aufgenommen	48
5.10	Verformung des Textils bei Einsatz von Positiv- und Negativform (quadratische Anordnung)	48
5.11	Einheitszellen bei quadratischer Noppenanordnung	49
5.12	Werkzeugpaar in quadratischer Anordnung links: Parameter für die Berechnung der Textilverformung mitte: Werkzeuggeometrie des Negativwerkzeugs mit Bohrungen rechts: Werkzeuggeometrie des Positivwerkzeugs mit Zylinderstiften	50
5.13	Einheitszellen bei dreieckiger Anordnung	50
5.14	Positivwerkzeug mit gerafftem Textil	52
5.15	Lineare Verformung des Textils bei Einsatz von Positiv- und Negativform	52
5.16	Noppenanordnung bei der symmetrischen Noppenwabe, rechter Teil der Abbildung entspricht dem linken Muster um 45 ° gedreht (weiß: nach oben gerichtet grau: nach unten gerichtet)	53
5.17	Verformung des Textils bei Einsatz von zwei Positivwerkzeugen	54
5.18	Draufsicht auf eine symmetrische Noppenwabe mit Zellweite a_{symm} und Durchmesser d der formgebenden Zylinderstifte	54
5.19	Ermittlung der Oberfläche im CAD-Modell	55
5.20	Formänderung der symmetrischen Noppenwabe in der xz-Ebene	56
6.1	Notwendige Fertigungsschritte zur Herstellung einer textilen Noppenwabe mit duromerer Harzmatrix	58
6.2	Band mit Positiv-Werkzeugelementen zur Ausformung der Noppenkontur	59
6.3	Ineinander greifende formgebende Bänder mit Positiv-Werkzeugelementen zur Herstellung symmetrischer Noppenwaben	60
6.4	Walzenpaar mit Positiv-Werkzeugelementen	60
6.5	Walzenpaar mit Positiv-Werkzeugelementen - Detailansicht	61
6.6	Walze mit negativer Noppenkontur	61
6.7	Walze mit Noppenkontur und Netz als Gegenhalter bzw. Negativwerkzeug	62
6.8	Kombination mehrerer Walzen zur kontinuierlichen Herstellung von Noppenwaben	63
6.9	Bewertungsmatrix für den Vergleich der verschiedenen Fertigungskonzepte	64
6.10	Angegriffenes und mittlerweile raues Silikonwerkzeug (Positivform)	67
6.11	Verschiedene Entwicklungsstufen der Anlagen zur kontinuierlichen Herstellung von Noppenwaben	70
6.12	Schematische Darstellung der Versuchsanlage zur kontinuierlichen Herstellung von Noppenwaben	71
6.13	Im Rahmen der Arbeit aufgebaute Pilotanlage zur kontinuierlichen Herstellung symmetrischer Noppenwaben als Kernmaterial	71
6.14	Prozessschritte zur kontinuierlichen Herstellung von Noppenwaben	72
6.15	Sprühdüsen zum automatisierten Auftrag des Trennmittels im laufenden Betrieb	73
6.16	Textil rutscht beim Zusammenlaufen der Werkzeugbänder nach und wird gerafft	73
6.17	Angetriebene Nadelwalze für die Textilizuführung	74
6.18	Nadelkette im Spannrahmen zur Textilizuführung (Quelle: Monforts Textilmaschinen)	74
6.19	Die Textilizuführung über ein Trägermaterial ermöglicht den Transport des Textils, ohne dieses einer Zugbelastung auszusetzen. (Textilizuführung an der Versuchsanlage)	75
6.20	Scharnierplattenband mit aufgeschraubten Werkzeugelementen	76

6.21	Werkzeugelement, bestehend aus einem Aluminium Grundkörper mit eingeklebten Zylinderstiften aus Stahl (100Cr6)	77
6.22	Wechselmodul zur Herstellung unterschiedlicher Noppengeometrien	77
6.23	Werkzeugkonfigurationen an der Versuchsanlage: links: Positiv- und Negativwerkzeug zur Herstellung einseitiger Noppenwaben rechts: Positiv- und Positivwerkzeug zur Herstellung symmetrischer Noppenwaben . .	78
6.24	Vorrichtung zur Aufwicklung und Lagerung eines Werkzeugbandes	78
6.25	IR-Strahler zur Temperierung der formgebenden Strecke an der Pilotanlage	80
6.26	Messingbürste zur Reinigung der formgebenden Werkzeugelemente	81
6.27	Zusammensetzung der Kosten zur Herstellung brandfester Noppenwaben (Textil 1, Harz Ph1, Noppenhöhe 5 mm, Anlagengeschwindigkeit von 1 m/min)	83
7.1	Erfassung der Werkzeugtemperatur im Auslaufbereich mittels IR-Thermometer	86
7.2	Bestimmung der B-Zeit bei 150°C auf Heizplatte	87
7.3	Vergleich von mit Textil 1 hergestellten Noppenwaben	88
7.4	Vergleich von mit Textil 2 hergestellten Noppenwaben	88
7.5	Prüfaufbau zur vergleichenden Messung der Druckfestigkeit ohne Decklagen	90
7.6	Vergleich der Druckfestigkeit symmetrischer Noppenwaben aus verschiedenen Harz-Textil-Kombinationen in Abhängigkeit vom Raumgewicht (Test ohne Decklagen) . .	91
7.7	Streuung bei Noppenwaben mit ungleichmäßiger Noppenhöhe (Textil 2 - Harz Ph1), gemessen mit Decklagen (Isovolta Airpreg 8242 1-lagig)	92
7.8	Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Probenmasse bei symmetrischen Noppenwaben (ohne Decklagen) (Textil 2 - Harz Ph1). Lineare Regressionsgerade als gepunktete Linie dargestellt.	93
7.9	Druckfestigkeit über dem Raumgewicht bei verschiedenen Kernmaterialien, gemessen mit Decklage Isovolta Airpreg 8242 1-lagig	95
7.10	Prüfvorrichtung zur Untersuchung der Schubfestigkeit. Dargestellt ist ein zwischen den beiden Metallplatten eingeklebter Probekörper, der durch das Verschieben der Platten auf Schub beansprucht wird.	96
7.11	Schubfestigkeit verschiedener Kernmaterialien im Vergleich, gemessen mit Decklage Isovolta Airpreg 8242 1-lagig	98
7.12	Vergleich der Geometrie zwischen einseitiger und symmetrischer Noppenwabe	98
7.13	Prüfaufbau des Trommelschälversuchs zur Untersuchung der Anbindung des Kernmaterials an die Decklagen	99
7.14	Messkurven symmetrischer Noppenwaben im Trommelschälversuch (Textil 1, Harz Ph1), gemessen mit Decklage Isovolta Airpreg 8242 1-lagig	100
7.15	Messkurven von Rohacell®51 RIST im Trommelschälversuch, gemessen mit Decklage Isovolta Airpreg 8242 1-lagig	100
7.16	Ergebnisse des Trommelschälversuchs bei verschiedenen Kernmaterialien (Schälkraft abzüglich Leermessung)	102
7.17	Prüfaufbau für 4P-Biegeversuch	102
7.18	Ablösen der oberen Decklage bei Biegebeanspruchung - Symmetrische Noppenwabe mit Textil 2 - Harz Cy1	103
7.19	Einknicken der oberen Decklage in den ungestützten Bereichen zwischen den Noppen	104
7.20	Ergebnisse des 4P-Biegeversuchs: Darstellung der Biegefestigkeit über dem Raumgewicht der Kernmaterialien	104
7.21	Versuchsaufbau für Impact-Test; a) Seitenansicht des Aufbaus; b) Fixierung der Probe; c) Sandwichplatte mit Fallbolzen	106
7.22	links: Honeycomb-Probe nach 4 J (a) und 7 J (b) Impact-Beanspruchung rechts: Noppenwaben-Probe nach 4 J (c) und 8 J (d) Impact-Beanspruchung	107
7.23	Kraft in Abhängigkeit der gemessenen Verformung bei Honeycomb- und Noppenwaben-Sandwiches bei Impact-Lasten von 3 J, 4 J und 5 J (in allen Fällen Versagensfall A)	108

7.24 a)	Kraft in Abhängigkeit der gemessenen Verformung für Noppenwaben-Sandwich bei 7 J Impact-Last	
b)	Kraft in Abhängigkeit der gemessenen Verformung für Honeycomb-Sandwich bei 7 J Impact-Last	
c)	Energie in Abhängigkeit der gemessenen Verformung für Noppenwaben-Sandwich bei 7 J Impact-Last	
d)	Energie in Abhängigkeit der gemessenen Verformung für Honeycomb-Sandwich bei 7 J Impact-Last	109
7.25 a)	Energie bei Maximalkraft und End-Energie in Abhängigkeit von der Impact-Belastung bei Noppenwaben-Sandwiches	
b)	Energie bei Maximalkraft und End-Energie in Abhängigkeit von der Impact-Belastung bei Honeycomb-Sandwiches (Heller Hintergrund für Versagensfall A bzw. dunkel für Versagensfall B)	111
7.26	links: Honeycomb-Sandwich mit durchstoßener Decklage nach Impact-Belastung mit 4,53 J rechts: Noppenwaben-Sandwich mit eingedellter Decklage nach Impact-Belastung mit 5,4 J	112
7.27	Prüfaufbau der Brandversuche am Cone-Calorimeter (eigene Darstellung nach [90]) .	113
7.28	Maximale Wärmefreisetzungsrate der untersuchten Kernmaterialien	115
7.29	Gesamtwärmefreisetzung der untersuchten Kernmaterialien	116
7.30	Maximalwert der mittleren Wärmeemission der untersuchten Kernmaterialien	116
7.31	Gesamtrauchfreisetzung der untersuchten Kernmaterialien	117
7.32 a)	Referenzbauteil mit Honeycomb-Kern b): Bauteil mit symmetrischer Noppenwabe als Kernmaterial (Bauteile von Diehl Aircabin hergestellt)	118
7.33	Faltenbildung im Bereich des Fenstertrichters	119

Tabellenverzeichnis

5.1	Vergleich der Textilverformung zwischen Berechnung und CAD-Modell	56
5.2	Textilverformung bei der Formgebung zur Noppenwabe	57
6.1	Oberflächenenergien ausgewählter Werkstoffe (nach [67])	67
7.1	B-Zeit verschiedener Harze (bei 150°C)	87
7.2	Versuchsprotokoll zur Herstellung symmetrischer Noppenwaben (Texil 1, Harz Ph1) .	89
7.3	Messwerte: Druckversuch ohne Decklagen - Sym. Noppe kont. Textil 2 - Harz Ph1 (Phenol)	93
7.4	Im Druckversuch untersuchte Kernwerkstoffe (nach DIN 53291), gemessen mit Deck- lage Isovolta Airpreg 8242 1-lagig	94
7.5	Im Schubversuch untersuchte Kernwerkstoffe, gemessen mit Decklage Isovolta Airpreg 8242 1-lagig	97
7.6	Im Trommelschälversuch untersuchte Kernmaterialien, gemessen mit Decklage Iso- volta Airpreg 8242 1-lagig	101
7.7	Im 4P-Biegeversuch untersuchte Kernmaterialien, gemessen mit Decklage Isovolta Airpreg 8242 1-lagig	105
7.8	Vergleich zwischen voreingestellter und tatsächlicher Impact-Energie NW = Noppenwabe HC = Honeycomb	107
7.9	Messwerte symmetrischer Noppenwaben und Honeycombs bei verschiedenen Impact- Lasten, gemessen mit Decklage Isovolta Airpreg 8242 1-lagig	110
7.10	Im Cone-Calorimeter untersuchte Kernmaterialien (gemessen mit Decklagen Isovolta Airpreg 8242 1-lagig)	114
A.1	Versuchsprotokoll - Textil 1 - Harz Ph1	137
A.2	Versuchsprotokoll - Textil 1 - Harz Ph2	137
A.3	Versuchsprotokoll - Textil 1 - Harz Ph3	137
A.4	Versuchsprotokoll - Textil 1 - Harz Cy1	138
A.5	Versuchsprotokoll - Textil 1 - Harz Cy2	138
A.6	Versuchsprotokoll - Textil 1 - Harz EpCy1	138
A.7	Versuchsprotokoll - Textil 2 - Harz Ph1	139
A.8	Versuchsprotokoll - Textil 2 - Harz Ph2	139
A.9	Versuchsprotokoll - Textil 2 - Harz Ph3	139
A.10	Versuchsprotokoll - Textil 2 - Harz Cy1	140
A.11	Versuchsprotokoll - Textil 2 - Harz Cy2	140
A.12	Versuchsprotokoll - Textil 2 - Harz EpCy1	140

Geräteverzeichnis

[G1] Cone-Calorimeter

Modell: Cone Calorimeter, Fire Testing Technologies Ltd., Grinstead, Großbritannien

[G2] Heizplatte

Modell: TC-4, Gel Instruments AG, Oberutzwil, Schweiz

[G3] Impact-Prüfstand

Modell: Imatec IM10, Imatek Ltd., Old Knebworth, Großbritannien

[G4] Profilometer

Modell: Dektak 8, Veeco Instruments Inc., New York, USA

[G5] Prüfraumen für Zug- und Druckversuche

Modell: Instron 3369, Instron Corp., Norwood, Massachusetts, USA

[G6] Rucks Presse

Modell: Rucks ES 279.00, Rucks Maschinenbau GmbH, Glauchau, Deutschland

[G7] Trockenschrank

Modell: VTL 60/90, Vötsch Industrietechnik GmbH, Reiskirchen-Lindenstruth, Deutschland

A Anhang

A.1 Patentrecherche zur Noppenwabe

Die für die Patentrecherche zur Noppenwabe verwendeten Suchbegriffe sind nachstehend aufgelistet. Es wurden sowohl Teile der Suchbegriffe als auch verschiedene Kombinationen der Suchbegriffe für die Recherche verwendet.

- Noppenwabe
- Noppenbahn
- Textil
- Core
- Textile core
- Textile Sandwich
- Napcore
- Corrugated
- 3D core
- 3D textile
- Honeycomb
- Sandwich Core

Als Recherchequellen kamen freepatensonline, depatisnet, google scholar und google patents zum Einsatz. Es wurden sowohl die durch die Suchbegriffe gefunden Patente als auch die in den Suchergebnissen referierten Patente betrachtet. Besonderer Fokus lag auf der Patentklasse B32B „Schichtkörper, d.h. aus ebenen oder gewölbten Schichten, z.B. mit zell- oder wabenförmiger Form, aufgebaute Erzeugnisse“.

Die ermittelten Patente sind im Folgenden aufgelistet:

1. Keith, D.G. (1973)

Patent DE2258513B2 - Genopptes Flachmaterial sowie Verfahren und Vorrichtung für seine Herstellung

2. Wolf, P. (1983)

Patent DE3139222A1 - Wetterfeste Tischtennisplatte sowie Verfahren und Vorrichtung zu ihrer Herstellung

3. Disselbeck, D. (1990)

Patent EP0158234B1 - Flächenförmiger Sandwichformkörper

4. Disselbeck, D. und Stahl, D. (1985)

Patent US4631211 - Sheet-like sandwich molding

5. Weber, P. und Stallmann, K. (1994)
Patent EP0385432B1 - Verfahren zur Herstellung eines dreidimensional verformten, beharzten Textilmaterials und seine Verwendung

6. Klecka, M. und Schetter, R. (1996)
Patent EP0324714B1 - Textiles Flächenmaterial

7. Klecka, M. (1992)
Patent EP0386387B1 - Flächenhafte Grenzschichtverbindung und Verfahren zu deren Herstellung

8. Klecka, M. (1992)
Patent EP0386864B1 - Be- oder Verkleidungsbaulement

9. Ashtiani-Zarandi, M. und Tishbi, Y. und Welch, J.A. (1990)
Patent US4890877 - Energy absorption system for vehicle door and method of making

10. Gebauer, E. und Blaschke, K. und Mildenerberger, H. (1992)
Patent US5158821 - Formable textile sheet material and network materials produced therefrom

11. Disselbeck, D. und Gebauer, E. (1994)
Patent US5364686 - Manufacture of a three-dimensionally shaped textile material and use thereof

12. Disselbeck, D. und Gebauer, E. (1992)
Patent EP0523431B1 - Verfahren zur Herstellung eines dreidimensional verformten Textilmaterials und seine Verwendung

13. Irbis Research + Consulting AG (1992)
Patent EP0480140A2 - Method and apparatus for manufacturing dimpled structures from elastic cloth

14. Brüning, H.J. und Eichnauer, D. (1997)
Patent DE19721370A1 - Verfahren zur Herstellung eines dreidimensional verformten Netzwerkstoffes, Netzwerkstoff, sowie Verwendung dieses Netzwerkstoffes

15. Rust, H. (2001)
Patent DE10012418A1 - Noppenwalze für die Herstellung von Noppenbahnen

16. Bauer, M. und Uhlig, C. (2009)
Patent EP1831009B1 - Bauelement, insbesondere Wandverkleidung und Verfahren zu dessen Herstellung

A.2 Versuchsprotokolle

Tab. A.1: Versuchsprotokoll - Textil 1 - Harz Ph1

Harz	Harz Ph1 (Phenol)		
Textil	Textil 1 - (90 g/m ² - 80% Aramid, 20% Polyester)		
Geschw. Hauptantriebe (v)	0,2 m/min		
Textilzuführung	v + 30 %		
	Soll [°C]	Ist [°C]	IR-Messung an Zylinderstiften
Temperatur Werkzeugband oben	150	146	180 ± 5
Temperatur Werkzeugband unten	150	140	180 ± 5
Bemerkungen	<ul style="list-style-type: none"> - Problemlose Herstellung der Noppenwabe - einfaches Entformen, Noppenwabe ist formstabil aber noch nicht ausgehärtet - Nachhärten im Trockenschrank (135 °C - 60 min) - Raumgewicht 28 kg/m³ - Höhe des Kernmaterials: ca. 9,3 mm 		

Tab. A.2: Versuchsprotokoll - Textil 1 - Harz Ph2

Harz	Harz Ph2 (Phenol)		
Textil	Textil 1 - (90 g/m ² - 80% Aramid, 20% Polyester)		
Geschw. Hauptantriebe (v)	0,2 m/min		
Textilzuführung	v + 30 %		
	Soll [°C]	Ist [°C]	IR-Messung an Zylinderstiften
Temperatur Werkzeugband oben	150	146	180 ± 5
Temperatur Werkzeugband unten	150	144	180 ± 5
Bemerkungen	<ul style="list-style-type: none"> - Problemlose Herstellung der Noppenwabe - einfaches Entformen, Noppenwabe ist formstabil aber noch nicht ausgehärtet - Nachhärten im Trockenschrank (135 °C - 60 min) - Raumgewicht 31 kg/m³ - Höhe des Kernmaterials: ca. 8,4 mm 		

Tab. A.3: Versuchsprotokoll - Textil 1 - Harz Ph3

Harz	Harz Ph3 (Phenol mit Holzöl modifiziert)		
Textil	Textil 1 - (90 g/m ² - 80% Aramid, 20% Polyester)		
Geschw. Hauptantriebe (v)	0,2 m/min		
Textilzuführung	v + 30 %		
	Soll [°C]	Ist [°C]	IR-Messung an Zylinderstiften
Temperatur Werkzeugband oben	150	147	180 ± 5
Temperatur Werkzeugband unten	150	145	180 ± 5
Bemerkungen	<ul style="list-style-type: none"> - Problemlose Herstellung der Noppenwabe - einfaches Entformen, Noppenwabe ist formstabil aber noch nicht ausgehärtet - Nachhärten im Trockenschrank (135 °C - 60 min) - Raumgewicht 31 kg/m³ - Höhe des Kernmaterials: ca. 8,4 mm 		

Tab. A.4: Versuchsprotokoll - Textil 1 - Harz Cy1

Harz	Harz Cy1 (Cyanat)		
Textil	Textil 1 - (90 g/m ² - 80% Aramid, 20% Polyester)		
Geschw. Hauptantriebe (v)	0,2 m/min		
Textilzuführung	v + 30 %		
	Soll [°C]	Ist [°C]	IR-Messung an Zylinderstiften
Temperatur Werkzeugband oben	150	149	180 ± 5
Temperatur Werkzeugband unten	150	144	180 ± 5
Bemerkungen	<ul style="list-style-type: none"> - Problemlose Herstellung der Noppenwabe - etwas schwereres Entformen als bei Phenolharz, Noppenwabe ist formstabil aber noch nicht ausgehärtet - Nachhärten im Trockenschrank (160 °C - 30 min) - Raumgewicht 31 kg/m³ - Höhe des Kernmaterials: ca.9,1 mm 		

Tab. A.5: Versuchsprotokoll - Textil 1 - Harz Cy2

Harz	Harz Cy2 (Cyanat)		
Textil	Textil 1 - (90 g/m ² - 80% Aramid, 20% Polyester)		
Geschw. Hauptantriebe (v)	0,2 m/min		
Textilzuführung	v + 30 %		
	Soll [°C]	Ist [°C]	IR-Messung an Zylinderstiften
Temperatur Werkzeugband oben	150	147	180 ± 5
Temperatur Werkzeugband unten	150	143	180 ± 5
Bemerkungen	<ul style="list-style-type: none"> - Problemlose Herstellung der Noppenwabe - etwas schwereres Entformen als bei Phenolharz, Noppenwabe ist formstabil aber noch nicht ausgehärtet - Nachhärten im Trockenschrank (160 °C - 30 min) - Raumgewicht 28 kg/m³ - Höhe des Kernmaterials: ca.8,8 mm 		

Tab. A.6: Versuchsprotokoll - Textil 1 - Harz EpCy1

Harz	Harz EpCy1 (Epoxid-Cyanat-Copolymer)		
Textil	Textil 1 - (90 g/m ² - 80% Aramid, 20% Polyester)		
Geschw. Hauptantriebe (v)	0,2 m/min		
Textilzuführung	v + 30 %		
	Soll [°C]	Ist [°C]	IR-Messung an Zylinderstiften
Temperatur Werkzeugband oben	150	149	180 ± 5
Temperatur Werkzeugband unten	150	146	180 ± 5
Bemerkungen	<ul style="list-style-type: none"> - Schwereres Entformen als bei Cyanatharz - Noppenwabe ist beim Entformen sehr weich, wird aber bei sinkender Temperatur schnell fest - Nachhärten im Trockenschrank (160 °C - 30 min) - Raumgewicht 32 kg/m³ - Höhe des Kernmaterials: ca.8,5 mm - Bei der Herstellung von Sandwichplatten im Vakuumaufbau kollabierte die Noppenwabe bei 130 °C 		

Tab. A.7: Versuchsprotokoll - Textil 2 - Harz Ph1

Harz	Harz Ph1 (Phenol)		
Textil	Textil 2 - (165 g/m ² - 80% Aramid, 20% Polyester)		
Geschw. Hauptantriebe (v)	0,2 m/min		
Textilzuführung	v + 30 %		
	Soll [°C]	Ist [°C]	IR-Messung an Zylinderstiften
Temperatur Werkzeugband oben	150	148	180 ± 5
Temperatur Werkzeugband unten	150	144	180 ± 5
Bemerkungen	<ul style="list-style-type: none"> - Problemlose Herstellung der Noppenwabe - einfaches Entformen, Noppenwabe ist formstabil aber noch nicht ausgehärtet - Nachhärten im Trockenschrank (135 °C - 60 min) - Raumgewicht 58 kg/m³ - Höhe des Kernmaterials: ca.7,5 mm 		

Tab. A.8: Versuchsprotokoll - Textil 2 - Harz Ph2

Harz	Harz Ph2 (Phenol)		
Textil	Textil 2 - (165 g/m ² - 80% Aramid, 20% Polyester)		
Geschw. Hauptantriebe (v)	0,2 m/min		
Textilzuführung	v + 30 %		
	Soll [°C]	Ist [°C]	IR-Messung an Zylinderstiften
Temperatur Werkzeugband oben	150	147	180 ± 5
Temperatur Werkzeugband unten	150	143	180 ± 5
Bemerkungen	<ul style="list-style-type: none"> - Problemlose Herstellung der Noppenwabe - einfaches Entformen, Noppenwabe ist formstabil aber noch nicht ausgehärtet - Nachhärten im Trockenschrank (135 °C - 60 min) - Raumgewicht 64 kg/m³ - Höhe des Kernmaterials: ca.7,5 mm 		

Tab. A.9: Versuchsprotokoll - Textil 2 - Harz Ph3

Harz	Harz Ph3 (Phenol mit Holzöl modifiziert)		
Textil	Textil 2 - (165 g/m ² - 80% Aramid, 20% Polyester)		
Geschw. Hauptantriebe (v)	0,2 m/min		
Textilzuführung	v + 30 %		
	Soll [°C]	Ist [°C]	IR-Messung an Zylinderstiften
Temperatur Werkzeugband oben	150	146	180 ± 5
Temperatur Werkzeugband unten	150	143	180 ± 5
Bemerkungen	<ul style="list-style-type: none"> - Problemlose Herstellung der Noppenwabe - einfaches Entformen, Noppenwabe ist formstabil aber noch nicht ausgehärtet - Nachhärten im Trockenschrank (135 °C - 60 min) - Raumgewicht 56 kg/m³ - Höhe des Kernmaterials: ca.8 mm 		

Tab. A.10: Versuchsprotokoll - Textil 2 - Harz Cy1

Harz	Harz Cy1 (Cyanat)		
Textil	Textil 2 - (165 g/m ² - 80% Aramid, 20% Polyester)		
Geschw. Hauptantriebe (v)	0,2 m/min		
Textilzuführung	v + 30 %		
	Soll [°C]	Ist [°C]	IR-Messung an Zylinderstiften
Temperatur Werkzeugband oben	150	147	180 ± 5
Temperatur Werkzeugband unten	150	143	180 ± 5
Bemerkungen	<ul style="list-style-type: none"> - Problemlose Herstellung der Noppenwabe - etwas schwereres Entformen als bei Phenolharz, Noppenwabe ist formstabil aber noch nicht ausgehärtet - Nachhärten im Trockenschrank (160 °C - 30 min) - Raumgewicht 60 kg/m³ - Höhe des Kernmaterials: ca.9 mm 		

Tab. A.11: Versuchsprotokoll - Textil 2 - Harz Cy2

Harz	Harz Cy2 (Cyanat)		
Textil	Textil 2 - (165 g/m ² - 80% Aramid, 20% Polyester)		
Geschw. Hauptantriebe (v)	0,2 m/min		
Textilzuführung	v + 30 %		
	Soll [°C]	Ist [°C]	IR-Messung an Zylinderstiften
Temperatur Werkzeugband oben	150	148	180 ± 5
Temperatur Werkzeugband unten	150	145	180 ± 5
Bemerkungen	<ul style="list-style-type: none"> - Problemlose Herstellung der Noppenwabe - etwas schwereres Entformen als bei Phenolharz, Noppenwabe ist formstabil aber noch nicht ausgehärtet - Nachhärten im Trockenschrank (160 °C - 30 min) - Raumgewicht 56 kg/m³ - Höhe des Kernmaterials: ca.8,1 mm 		

Tab. A.12: Versuchsprotokoll - Textil 2 - Harz EpCy1

Harz	Harz EpCy1 (Epoxid-Cyanat-Copolymer)		
Textil	Textil 2 - (90 g/m ² - 80% Aramid, 20% Polyester)		
Geschw. Hauptantriebe (v)	0,2 m/min		
Textilzuführung	v + 30 %		
	Soll [°C]	Ist [°C]	IR-Messung an Zylinderstiften
Temperatur Werkzeugband oben	150	146	180 ± 5
Temperatur Werkzeugband unten	150	142	180 ± 5
Bemerkungen	<ul style="list-style-type: none"> - Schwereres Entformen als bei Cyanatharz - Noppenwabe ist beim Entformen sehr weich, wird aber bei sinkender Temperatur schnell fest - Bei einer Geschwindigkeit von 0,05 m/min und einer Temperatur von ca. 200 °C an den Zylinderstiften (gemessen mit IR-Thermometer) bildeten sich beim Entformen Risse in der Noppenwabe über die gesamte Breite der Werkzeugelemente (quer zur Produktionsrichtung) - Nachhärten im Trockenschrank (160 °C - 30 min) - Raumgewicht 58 kg/m³ - Höhe des Kernmaterials: ca.8 mm - Bei der Herstellung von Sandwichplatten im Vakuumaufbau kollabierte die Noppenwabe bei 130 °C 		

A.3 Auslegung der Antriebe für die Pilotanlage

Auslegung der Antriebe für die Pilotanlage

Kette

Kettengewicht: 27,2 kg/m
 Werkzeug positiv: 1,4 kg/Stk
 Kettenteilung: 25,4 mm
 Kettenlänge: 9 m
 Gesamtgewicht: ~ 750 Kg

$$\text{Gesamtgewicht} = 9m * \left(27,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}} + \left(1,4 \frac{\text{kg}}{\text{Stk}} * \frac{1000 \text{ mm}}{25,4 \text{ mm}} \right) \right) = 740,86 \text{ kg}$$

Rollende Reibung der Ketten auf Stahlführungen

c	1		Stahlrolle auf Stahlführung bei rauher Oberfläche
μ_3	0,25		Stahlrolle auf Stahlbuchse bei mäßiger Schmierung
d_3	11	mm	Buchsendurchmesser
d_5	20	mm	Rollendurchmesser

$$\mu_2 = \frac{2 * c + \mu_3 * d_3}{d_5} = \frac{2 * 1 + 0,25 * 11}{20} = 0,2375$$

Kettenumfangszugkraft

a	4,5	m	Achsabstand
μ_2	0,2375		Rollwiderstandskoeffizient
M_K	90	kg/m	Kettengewicht
M_F	1	kg/m	Fördergutgewicht

$$F_G = 1,1 * a * \mu_2 * 9,81 * (2 * M_K + M_F) = 1,1 * 4,5 * 0,2375 * 9,81 * (2 * 90 + 1) = 2087,452 \text{ N}$$

Erforderliches Antriebsdrehmoment

Kettenumfangszugkraft	2088	N
r_Kettenrad	41	mm

$$M_{\text{Antrieb}} = 2088 \text{ N} * 0,041 \text{ m} = 85,608 \text{ Nm}$$

Kettenstützzugkraft = 4953 N

Gesamtkettenzugkraft = Kettenstützzugkraft + Kettenfliehzugkraft + Kettenumfangszugkraft = 7040 N

A.4 Auslegung der Lagerung für die Werkzeugbänder

Y-Lager SKF Lager für extreme Temperaturen.

VA 228 – Lager für extreme Temperaturen, Kronenkäfig aus Graphit

Hauptabmessungen			Tragzahlen			Grenzdrehzahl
d	D	B	C (dynamisch)	C ₀ (statisch)		VA 228
[mm]			[kN]			min^{-1}
20	47	31	13,5	6,55	YAR 204-2FW	270
30	62	38,1	20,3	11,2	YAR 206-2FW	200

Gesamtkettenzugkraft: 7040 N → wird aufgeteilt auf 2 Achsen (4 Lager) (Rechnung mit 8000 N)

Berechnung der Lagerkräfte:

Hauptlager für Antriebswelle und Welle am Kettenspanner (YAR 206-2FW)

P = äquivalente dynamische Lagerbelastung [kN]

F_r = Radialbelastung [kN]

f_T = Temperaturfaktor → 0,9 bei T = 200 °C

S_{req} = Richtwert für Sicherheitsfaktor für die dynamische Belastung → 5

C_{req} = erforderliche dynamische Tragzahl [kN]

$$c_{req} = S_{req} \cdot \frac{P}{f_t} = 5 \cdot \frac{(8 \text{ kN} / 4 \text{ Lager})}{0,9} = 11,11 \text{ kN} \quad 20,3 \text{ kN} > 11,11 \text{ kN} \rightarrow \text{Bedingung erfüllt}$$

C_{0req} = erforderliche statische Tragzahl [kN]

$$c_{0req} = 2 P_0 / f_T = 2 \cdot (8 \text{ kN} / 4 \text{ Lager}) / 0,9 = 4,44 \text{ kN} \quad 11,2 \text{ kN} > 4,44 \text{ kN} \rightarrow \text{Bedingung erfüllt}$$

Lager zur Vermeidung von Durchhang (YAR 204-2FW)

Kettengewicht oberes Band, halbe Kette ca. 800 kg/2 ca 4000 N → Aufgeteilt auf 8 Achsen/16 Lager

P = äquivalente dynamische Lagerbelastung [kN]

F_r = Radialbelastung [kN]

f_T = Temperaturfaktor → 0,9 bei T = 200 °C

S_{req} = Richtwert für Sicherheitsfaktor für die dynamische Belastung → 5

C_{req} = erforderliche dynamische Tragzahl [kN]

$$c_{req} = S_{req} \cdot \frac{P}{f_t} = 5 \cdot \frac{(0,25 \text{ kN})}{0,9} = 1,39 \text{ kN} \quad 13,5 \text{ kN} > 1,39 \text{ kN} \rightarrow \text{Bedingung erfüllt}$$

C_{0req} = erforderliche statische Tragzahl [kN]

$$c_{0req} = 2 P_0 / f_T = 2 \cdot (0,25 \text{ kN}) / 0,9 = 0,56 \text{ kN} \quad 6,55 \text{ kN} > 0,56 \text{ kN} \rightarrow \text{Bedingung erfüllt}$$